



**Diogo Gonalo Costa Pinto**

Licenciatura em Ci4ncias da Engenharia Civil

## **Aplicao do Seis Sigma no Processo de Moldao da Ind4stria Corticeira**

Dissertao para obteno do Grau de  
Mestre em Engenharia e Gesto Industrial

Orientador: Jos4 Gomes Requeijo, Professor Doutor,  
Universidade Nova de Lisboa

J4ri:

Presidente: Professora Doutora Alexandra Maria Baptista Ramos Tenera

Arguente: Professor Doutor Eus4bio Manuel Pinto Nunes

Vogal: Professor Doutor Jos4 Fernando Gomes Requeijo



FACULDADE DE  
CI4NCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2016**



## **Aplicação do Seis Sigma no Processo de Moldação da Indústria Corticeira**

Copyright © Diogo Gonçalo Costa Pinto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*"de todos, um..."*

MCMIV



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação, representa o culminar de mais uma etapa. Etapa essa que nem sempre correu como seria de esperar mas, mesmo com os seus altos e baixos foi concretizada.

No entanto, não bastou apenas o meu esforço para levar este trabalho a bom porto, foi fulcral a ajuda de várias pessoas que se atravessaram no meu caminho ao longo destes nove meses.

Neste sentido, tenho de começar por agradecer à Corticeira Amorim, em particular à Unidade Industrial Equipar por me ter acolhido para a realização deste trabalho. Quero agradecer também à Engenheira Maria que me propôs o desafio e me deu total liberdade para desenvolver o meu trabalho.

Como não podia deixar de ser, quero deixar um forte agradecimento ao Professor José Requeijo por toda a disponibilidade, orientação, abertura e apoio nos momentos mais complicados. Foi crucial para o desenvolvimento desta dissertação.

Não posso esquecer os meus colegas de estágio, João, Inês e Sara, pelo companheirismo e compreensão dos desabafos próprios de quem começou uma etapa nova na vida.

Um muito obrigado à equipa da extrusão da Twin-Top, que me ensinou a desenvolver relacionamentos pessoais em contexto de trabalho. Um obrigado especial à Susana Castanhas por todos os conselhos e ajuda em momentos menos bons, foi essencial a sua compreensão.

Um obrigado à equipa do laboratório da UI-Equipar, por toda a boa disposição, bom sentido de humor, e o desenvolvimento de uma relação que ia além do contexto formal do trabalho.

Não posso esquecer, também, a minha família, tenho que agradecer aos meus pais por todo o esforço que fizeram na minha educação, à minha irmã por fingir que ouvia as minhas queixas constantes.

Por último, aos meus amigos de sempre, aos "Bonecos" e às autoproclamadas "Princesas" que me acompanharam ao longo deste percurso académico. Que sejam amizades para manter.





## RESUMO

---

A cortiça é uma matéria-prima que apresenta uma grande versatilidade produtiva, tal versatilidade permite um grande índice de reaproveitamento dos desperdícios ou dos produtos não conformes. Assim, por vezes existe um menor rigor no controlo e melhoria de processos, que leva a uma estagnação evolutiva nos índices de qualidade e eficiência. Contudo, ainda que Portugal seja o maior exportador mundial de produtos de cortiça existe grande margem para melhorar os seus processos e os seus produtos.

Neste sentido, a presente dissertação, realizada na indústria corticeira, mais concretamente na Corticeira Amorim, SGPS, S.A - Unidade Industrial Equipar, tem o intuito de estudar e melhorar o processo de moldação. Para tal, recorreu-se ao Seis Sigma nas suas vertentes de metodologia e métrica.

Enquanto metodologia, aplicou-se o ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*). Em cada fase do ciclo utilizaram-se as técnicas e ferramentas da qualidade mais adequadas para definir o problema, medi-lo, analisar as suas causas potenciais, aplicar ações de melhoria e, por fim, proceder ao respetivo controlo. Do mesmo modo, recorreu-se à métrica do Seis Sigma para quantificar o problema, com base nos defeitos por milhão de oportunidades (DPMO), sendo o objetivo último do Seis Sigma atingir a meta de 3.4 DPMO.

Concluindo, existe grande margem para a melhoria dos processos produtivos da indústria corticeira. O presente estudo centra-se no Seis Sigma como metodologia e métrica para a resolução de problemas de forma estruturada. Realizou-se um estudo aprofundado sobre o processo de moldação, e no final do estudo obteve-se um nível sigma superior ao calculado à partida. Por fim, sugerem-se os métodos mais adequados para o controlo do processo para que se sustente a melhoria alcançada ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Seis Sigma, DMAIC, DPMO, cortiça, moldação.

---



## ABSTRACT

---

Cork is a raw material that has a great production versatility, such versatility allows a great reuse rate of waste or non-compliant products. Thus, sometimes there is less accuracy in controlling and improving processes, which leads to a stagnation in the evolutionary rates of quality and efficiency. However, although Portugal is the world's largest exporter of cork products there is great scope to improve their processes and products.

Therefore, the present dissertation was developed in cork industry, more specifically in Corticeira Amorim, SGPS, S.A - Unidade Industrial Equipar, with goal of study and improving the molding process. For this purpose was used the Six Sigma in its methodology and metric dimensions.

As methodology, was applied the DMAIC cycle (Define, Measure, Analyze, Improve and Control). In each phase was used the most appropriate quality tools and techniques for defining the problem, to measure it, analyze its potential causes and apply improvement actions, and finally, proceeding to the control of the process. In the same way, was used the metric of Six Sigma to quantify the problem, based on defects per million opportunities (DPMO), with the ultimate purpose of achieve the goal of 3.4 DPMO.

In conclusion, there is great scope for improving production processes of the cork industry. The present study focuses on the methodology and how Six Sigma metric for solving structured problems. Was conducted a thorough study of the molding process, and at the end of the study was obtained an improving of sigma level. Finally, it is suggested that the most suitable methods for the process control to improvement achieved over time be sustained.

**Keywords:** Six Sigma, DMAIC, DPMO, cork, molding.

---



# CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento, Motivação e Justificação do Tema . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Metodologia de Investigação . . . . .	3
1.4	Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Qualidade e Seis Sigma</b>	<b>7</b>
2.1	Qualidade . . . . .	7
2.1.1	Definição do conceito de Qualidade . . . . .	7
2.1.1.1	Qualidade enquanto excelência . . . . .	8
2.1.1.2	Qualidade enquanto valor . . . . .	8
2.1.1.3	Qualidade enquanto conformidade com as especificações . . . . .	9
2.1.1.4	Qualidade enquanto superação das expectativas do cliente . . . . .	10
2.1.2	Evolução Histórica da Qualidade . . . . .	11
2.2	Seis Sigma . . . . .	15
2.2.1	Origem do Seis Sigma . . . . .	15
2.2.1.1	Gerações do Seis Sigma . . . . .	16
2.2.2	Definição do Seis Sigma . . . . .	16
2.2.3	Benefícios esperados com a implementação do Seis Sigma . . . . .	18
2.2.4	Fatores chaves para o sucesso do Seis Sigma . . . . .	19
2.2.5	As várias dimensões do Seis Sigma . . . . .	20
2.2.5.1	Seis Sigma enquanto métrica . . . . .	21
2.2.5.2	Nível de qualidade Sigma . . . . .	22
2.2.5.3	Métricas baseadas em defeitos . . . . .	24
2.2.5.4	Seis Sigma enquanto metodologia . . . . .	25
2.2.5.5	Seis Sigma enquanto Sistema de Gestão . . . . .	26
2.2.5.6	Estrutura organizacional do Seis Sigma . . . . .	27
2.2.6	Ciclo DMAIC . . . . .	28
2.2.6.1	Fase <i>Define</i> . . . . .	29
2.2.6.2	Fase <i>Measure</i> . . . . .	30
2.2.6.3	Fase <i>Analyze</i> . . . . .	32
2.2.6.4	Fase <i>Improve</i> . . . . .	33

2.2.6.5	Fase <i>Control</i> . . . . .	34
2.2.7	Algumas Técnicas e Ferramentas da Qualidade utilizadas no Seis Sigma . . . . .	35
2.2.7.1	Diagrama SIPOC . . . . .	35
2.2.7.2	Project Charter . . . . .	36
2.2.7.3	Modelo de decisão TOPSIS . . . . .	36
2.2.7.4	Testes de Hipótese . . . . .	37
2.2.7.4.1	Comparação de duas variâncias . . . . .	37
2.2.7.4.2	Diferença de duas médias . . . . .	38
2.2.7.4.3	Comparação de duas proporções de defeituosos . . . . .	39
2.2.7.5	Capacidade de sistemas de medição . . . . .	40
2.2.7.5.1	Estudo da Repetibilidade . . . . .	40
2.2.7.6	Mapa de Processos . . . . .	41
2.2.7.7	Diagrama de Causa-Efeito . . . . .	42
2.2.7.8	Desenho de Experiências - um fator a vários níveis . . . . .	43
2.2.7.8.1	Verificação dos pressupostos da análise de variância . . . . .	45
2.2.7.8.2	Teste da menor diferença significativa . . . . .	46
2.2.7.9	Métodos de Taguchi . . . . .	46
2.2.7.9.1	Matriz $L_9$ para estudar fatores a três níveis . . . . .	47
2.2.7.10	Carta Laney $p'$ . . . . .	48
2.2.7.11	Teste de Bartlett . . . . .	51
2.2.7.12	Histograma . . . . .	52
2.2.7.13	Matriz de Prioridades . . . . .	53
2.2.7.14	VOC - <i>Voice of Customer</i> . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Apresentação da Empresa</b> . . . . .	<b>55</b>
3.1	Corticeira Amorim . . . . .	55
3.2	UI-Equipar . . . . .	56
3.3	Processo de Moldação . . . . .	60
3.3.1	Caracterização geral do processo . . . . .	60
3.3.2	Caracterização do funcionamento do Equipamento . . . . .	61
3.3.3	Controlo do processo efetuado . . . . .	62
3.4	Acabamentos Mecânicos . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Caso Prático</b> . . . . .	<b>65</b>
4.1	Define . . . . .	65
4.1.1	Seleção do projeto . . . . .	66
4.1.2	Declaração do projeto: <i>Project Charter</i> . . . . .	68
4.1.3	Características críticas da qualidade para o cliente . . . . .	69
4.1.4	SIPOC . . . . .	69
4.2	Measure . . . . .	70

4.2.1	Comparação entre Equipamentos para a proporção de defeituosos	70
4.2.2	Carta Laney p' . . . . .	72
4.2.3	Mapa de processo da moldação . . . . .	73
4.3	Analyze . . . . .	73
4.3.1	Reunião para gerar ideias sobre as causas potenciais do problema .	73
4.3.2	Diagrama espinha de peixe . . . . .	75
4.3.3	Avaliação da taxa de compressão . . . . .	75
4.3.4	Estudo de repetibilidade . . . . .	78
4.4	Improve . . . . .	79
4.4.1	Estudo do parâmetro <i>tandem</i> . . . . .	80
4.4.2	Métodos de Taguchi . . . . .	81
4.4.3	Relação Ing. 3 vs Ing. 2: DOE um fator a vários níveis . . . . .	83
4.4.3.1	Teste da Menor Diferença Significativa . . . . .	84
4.4.4	<i>Brainstorming</i> sobre as potenciais soluções . . . . .	85
4.4.5	Hierarquização das potenciais soluções . . . . .	85
4.4.6	Teste piloto a nível operacional . . . . .	87
4.4.6.1	Cálculo do novo nível sigma . . . . .	89
4.5	Control . . . . .	89
4.5.1	Avaliação das ações tomadas em larga escala . . . . .	89
4.5.2	Transmissão dos conhecimentos adquiridos . . . . .	90
4.5.3	Plano de monitorização e controlo . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>93</b>
5.1	Conclusões gerais . . . . .	93
5.2	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	95
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Tabelas Auxiliares</b>	<b>103</b>
A.1	Tabela de conversão de DPMO para a escala Sigma . . . . .	103
A.2	Tabela da distribuição normal reduzida . . . . .	104
A.3	Tabela de constantes para construção das cartas de controlo de variáveis .	105
<b>B</b>	<b>Cálculos da fase <i>Define</i></b>	<b>107</b>
B.1	Cálculos auxiliares do modelo TOPSIS . . . . .	107
<b>C</b>	<b>Cálculos da fase <i>Measure</i></b>	<b>109</b>
C.1	Dados para o cálculo da proporção de defeituosos das moldadoras . . . .	109
C.2	Normalidade dos dados para o Teste p . . . . .	111
C.3	Construção da carta Laney p' . . . . .	113
C.3.0.1	Teste diagnóstico do <i>Minitab</i> . . . . .	113
C.3.0.2	Fase 1 da carta Laney p' . . . . .	114

<b>D</b>	<b>Cálculos da fase <i>Analyze</i></b>	<b>119</b>
D.1	Estudo da repetibilidade . . . . .	119
D.1.1	Característica da qualidade: característica 1 . . . . .	119
D.1.2	Característica da qualidade: característica 2 . . . . .	120
D.1.3	Característica da qualidade: característica 3 . . . . .	121
D.2	Avaliação da taxa de compressão . . . . .	122
D.2.1	Dados para a construção do histograma . . . . .	122
<b>E</b>	<b>Cálculos da fase <i>Improve</i></b>	<b>127</b>
E.1	Estudo do parâmetro <i>tandem</i> . . . . .	127
E.1.1	Dados recolhidos . . . . .	127
E.1.2	Verificação da normalidade . . . . .	128
E.2	Método de Taguchi . . . . .	130
E.2.1	Cálculos do tratamento pela média . . . . .	130
E.2.2	Cálculos do tratamento pelo índice sinal-ruído . . . . .	130
E.3	Desenho de Experiências: Um fator a vários níveis . . . . .	131
E.3.1	Planeamento das Experiências . . . . .	131
E.3.2	Verificação dos pressupostos da análise de variância . . . . .	131
E.3.2.1	Normalidade . . . . .	131
E.3.2.2	Homogeneidade da variância . . . . .	133
E.3.2.3	Independência dos resíduos . . . . .	133



## LISTA DE FIGURAS

1.1	Fluxo produtivo da cortiça . . . . .	2
1.2	Esquema da abordagem ao caso de estudo . . . . .	4
2.1	Diferença de variabilidade . . . . .	11
2.2	Implementação de Seis Sigma em organizações . . . . .	15
2.3	Relação entre o rendimento e o nível sigma . . . . .	20
2.4	Seis Sigma enquanto métrica, metodologia e sistema de gestão . . . . .	21
2.5	Distribuição Normal com zonas de rejeição bilaterais . . . . .	22
2.6	Distribuição Normal com a média centrada no valor alvo ( $\mu = T$ ) . . . . .	23
2.7	Distribuição Normal com desvios da média de 1,5 sigma ( $\mu = T \pm 1.5\sigma$ ) . . . . .	23
2.8	Metodologia para escolha do modelo Seis Sigma . . . . .	26
2.9	Hierarquia do Seis Sigma baseada em cinturões . . . . .	28
2.10	Correspondência das etapas do ciclo DMAIC e PDCA . . . . .	28
2.11	Ciclo DMAIC . . . . .	29
2.12	Diagrama de atividades na fase <i>Define</i> e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares . . . . .	30
2.13	Diagrama de atividades na fase <i>Measure</i> e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares . . . . .	31
2.14	Diagrama de atividades na fase <i>Analyze</i> e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares . . . . .	32
2.15	Diagrama de atividades na fase <i>Improve</i> e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares . . . . .	33
2.16	Diagrama de atividades na fase <i>Control</i> e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares . . . . .	34
2.17	Exemplo de um mapa de processo sobre a compra de um sumo . . . . .	42
2.18	Exemplo de um diagrama Causa-Efeito . . . . .	43
2.19	Diagrama escolha da carta de proporção de defeituosos . . . . .	51
2.20	Exemplo de um Histograma . . . . .	53
3.1	Organograma resumido da Corticeira Amorim S.G.P.S., S.A. . . . .	56
3.2	Planta UI-Equipar . . . . .	57
3.3	Fluxograma produtivo UI - Equipar . . . . .	59
3.4	Representação em corte do Equipamento . . . . .	60

3.5	Pormenor da prensagem no molde . . . . .	62
3.6	Aparelho de medição automática MedCork . . . . .	62
3.7	Sequência do processo de Acabamentos Mecânicos . . . . .	63
4.1	Fase <i>Define</i> do ciclo DMAIC . . . . .	65
4.2	Fase <i>Measure</i> do ciclo DMAIC . . . . .	70
4.3	Representação de um corpo de rolha aglomerada com topo enviesado . . . . .	71
4.4	Distribuição Normal com Áreas de Rejeição . . . . .	71
4.5	Carta Laney $p'$ . . . . .	72
4.7	Fase <i>Analyze</i> do ciclo DMAIC . . . . .	73
4.6	Mapa de processos moldação . . . . .	74
4.8	Diagrama causa-efeito . . . . .	76
4.9	Esquema do volume do armazém . . . . .	77
4.10	Histograma do estudo da taxa de compressão . . . . .	79
4.11	Fase <i>Improve</i> do ciclo DMAIC . . . . .	79
4.12	Distribuição de Fisher com áreas de rejeição . . . . .	81
4.13	Esquema da metodologia da experiência . . . . .	84
4.14	Carta Laney $p'$ do teste piloto . . . . .	88
4.15	Fase <i>Control</i> do ciclo DMAIC . . . . .	89
C.1	Gráfico de Probabilidade - Equipamento 1 . . . . .	112
C.2	Gráfico de Probabilidade - Equipamento 2 . . . . .	112
C.3	Teste diagnóstico do <i>Minitab</i> . . . . .	113
C.4	Carta Laney $p'$ . . . . .	114
C.5	Carta Laney $p'$ (v1) . . . . .	115
C.6	Carta Laney $p'$ (v2) . . . . .	116
C.7	Carta Laney $p'$ (v3) . . . . .	117
D.1	Carta $R$ para a característica 1 . . . . .	120
D.2	Carta $\bar{X}$ para a característica 1 . . . . .	120
D.3	Carta $R$ para a característica 2 . . . . .	121
D.4	Carta $\bar{X}$ para a característica 2 . . . . .	121
D.5	Carta $R$ para a característica 3 . . . . .	122
D.6	Carta $\bar{X}$ para a característica 3 . . . . .	122
E.1	Gráfico de Probabilidade - Sem <i>tandem</i> . . . . .	129
E.2	Gráfico de Probabilidade - Com <i>tandem</i> . . . . .	129
E.3	Gráfico de Probabilidade - Resíduos . . . . .	133
E.4	Gráfico de Probabilidade - Resíduos . . . . .	134

## LISTA DE TABELAS

2.1	Qualidade enquanto excelência . . . . .	8
2.2	Qualidade enquanto valor . . . . .	9
2.3	Qualidade enquanto conformidade com as especificações . . . . .	10
2.4	Qualidade enquanto superação das expectativas do cliente . . . . .	10
2.5	Evolução Histórica da Qualidade . . . . .	12
2.6	As quatro eras da Qualidade . . . . .	14
2.7	Gerações do Seis Sigma . . . . .	16
2.8	Revisão bibliográfica da definição de Seis Sigma . . . . .	17
2.9	<i>Ranking</i> de técnicas de melhoria de processos . . . . .	18
2.10	Benefícios do Seis Sigma . . . . .	19
2.11	DPMO com $\mu = T$ . . . . .	23
2.12	DPMO com $\mu = T \pm 1.5\sigma$ . . . . .	23
2.13	Funções dos intervenientes no Seis Sigma . . . . .	27
2.14	Representação de um diagrama SIPOC . . . . .	35
2.15	Limites de controlo das cartas $\bar{X}$ e $R$ . . . . .	40
2.16	Desenho com um fator a vários níveis . . . . .	43
2.17	Tabela ANOVA para um fator a vários níveis . . . . .	44
2.18	Matriz $L_9$ para estudar fatores a três níveis . . . . .	47
2.19	Matriz de prioridade dos critérios . . . . .	53
2.20	Matriz de prioridade das opções para cada critério . . . . .	54
2.21	Matriz de prioridade das opções para cada critério . . . . .	54
3.1	Volume de vendas Corticeira Amorim S.G.P.S., S.A. (2015) . . . . .	55
3.2	Tipos de granulados comercializados na UI-Equipar . . . . .	58
3.3	Tipos de rolhas comercializadas na UI-Equipar . . . . .	58
3.4	Formulação da mistura no processo de Moldação . . . . .	61
3.5	Tempos de permanência nas zonas do Equipamento . . . . .	61
3.6	Características da qualidade e limites de especificação . . . . .	63
4.1	Ferramentas utilizadas na fase <i>Define</i> . . . . .	66
4.2	Principais Problemas Moldadora . . . . .	66
4.3	Critérios de seleção e Pesos . . . . .	66
4.4	Matriz de atributos . . . . .	67

4.5	Matriz de atributos normalizada . . . . .	67
4.6	Matriz de atributos normalizada ponderada . . . . .	67
4.7	Priorização dos alternativas de projeto . . . . .	67
4.8	<i>Project Charter</i> - Declaração do projeto . . . . .	68
4.9	Diagrama SIPOC . . . . .	69
4.10	Ferramentas utilizadas na fase <i>Measure</i> . . . . .	70
4.11	Proporção de defeituosos dos Equipamentos . . . . .	71
4.12	Nível Sigma . . . . .	72
4.13	Ferramentas utilizadas na fase <i>Analyze</i> . . . . .	73
4.14	Ferramentas utilizadas na fase <i>Improve</i> . . . . .	80
4.15	Parâmetros das amostras para o ensaio <i>tandem</i> . . . . .	80
4.16	Método de Taguchi: Fatores e respectivos níveis . . . . .	81
4.17	Valores das respostas para o comprimento . . . . .	82
4.18	Tabela ANOVA para tratamento pela média . . . . .	82
4.19	Tabela ANOVA para tratamento pelo índice sinal-ruído . . . . .	82
4.20	Níveis para a reprodução das experiências em laboratório . . . . .	83
4.21	Valores da resposta . . . . .	84
4.22	Tabela ANOVA do tratamento dos dados . . . . .	84
4.23	Dados para o teste da menor diferença significativa . . . . .	84
4.24	Comparação dos pares combinados entre níveis . . . . .	85
4.25	Identificação das potenciais soluções . . . . .	85
4.26	Lista de critérios de avaliação . . . . .	86
4.27	Ponderação dos critérios definidos pela equipa . . . . .	86
4.28	Matriz de prioridade dos critérios . . . . .	86
4.29	Matriz de prioridades das soluções para o critério A . . . . .	86
4.30	Matriz de prioridades das soluções para o critério B . . . . .	86
4.31	Matriz de prioridades das soluções para o critério C . . . . .	87
4.32	Matriz de prioridade das soluções potenciais vs critérios de seleção . . . . .	87
4.33	Amostras do teste piloto . . . . .	88
4.34	Novo nível sigma . . . . .	89
4.35	Ferramentas sugeridas para a fase <i>Control</i> . . . . .	90
A.1	Conversão de DPMO em nível sigma . . . . .	103
A.2	Tabela da distribuição normal reduzida . . . . .	104
A.3	Constantes para a construção das cartas de controlo de variáveis . . . . .	105
B.1	Matriz de atributos normalizada ponderada . . . . .	107
B.2	Melhor solução . . . . .	107
B.3	Pior solução . . . . .	107
B.4	Distâncias Euclidianas à melhor solução . . . . .	108
B.5	Distâncias Euclidianas à pior solução . . . . .	108

---

C.1	Proporção de defeituosos dos Equipamentos . . . . .	109
C.2	Dados para construção da Carta Laney $p'$ . . . . .	114
C.3	Dados para construção da Carta Laney $p'$ (v1) . . . . .	115
C.4	Dados para construção da Carta Laney $p'$ (v2) . . . . .	116
C.5	Dados para construção da Carta Laney $p'$ (v2) . . . . .	117
D.1	Dados para estudo da repetibilidade: característica 1 . . . . .	119
D.2	Dados para estudo da repetibilidade: característica 2 . . . . .	120
D.3	Dados para estudo da repetibilidade: característica 3 . . . . .	121
D.4	Dados para estudo da taxa de compressão . . . . .	122
E.1	Dados para o estudo do parâmetro <i>tandem</i> . . . . .	127
E.2	Valores para o tratamento dos dados pela média . . . . .	130
E.3	Valores para o tratamento dos dados pelo índice (S/N) . . . . .	131
E.4	Planeamento das experiências . . . . .	131
E.5	Ordem de execução das experiências . . . . .	132
E.6	Cálculo dos resíduos . . . . .	132
E.7	Dados para o Teste de Bartlett . . . . .	133
E.8	Resíduos pela ordem aleatória . . . . .	134



## LISTA DE SIGLAS

<b>ABB</b>	<i>ASEA Brown Boveri</i>
<b>AD</b>	Alta Densidade
<b>ADT</b>	Alta Densidade Terras
<b>AGLO</b>	Aglomerada
<b>AHP</b>	<i>Anaytic Hierarchy Process</i>
<b>ANOVA</b>	<i>Analysis Of Variance</i>
<b>BD</b>	Baixa Densidade
<b>CPM</b>	<i>Critical Path Method</i>
<b>CTQ</b>	<i>Critical To Quality</i>
<b>DEC</b>	<i>Digital Equipment Corporation</i>
<b>DFSS</b>	<i>Design For Six Sigma</i>
<b>DMADOV</b>	<i>Define, Measure, Analyze, Design, Optimize, Verify</i>
<b>DMADV</b>	<i>Define, Measure, Analyze, Design, Verify</i>
<b>DOE</b>	<i>Design of Experiments</i>
<b>DPMO</b>	Defeitos por Milhão de Oportunidades
<b>DPO</b>	Defeitos por Oportunidade
<b>DPU</b>	Defeitos por Unidade
<b>EQ<sub>D</sub></b>	Equipar Distribuição
<b>FMEA</b>	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i> item <b>[GE]</b> <i>General Eletric</i>
<b>IBM</b>	International Business Machines
<b>ICOV</b>	<i>Identify, Characterize, Optimize, Verify</i>
<b>IDOV</b>	<i>Identify, Design, Optimize, Verify</i>

<b>IT</b>	<i>Information Technology</i>
<b>LC</b>	Limite Central
<b>LIC</b>	Limite Inferior de Controlo
<b>LIE</b>	Limite Inferior de Especificação
<b>LSC</b>	Limite Superior de Controlo
<b>LSE</b>	Limite Superior de Especificação
<b>LSD</b>	<i>Least Signifcant Difference</i>
<b>MD</b>	Média Densidade
<b>PDVA</b>	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
<b>PERT</b>	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
<b>RA</b>	Rolha Aglomerada
<b>RCT</b>	Rolha de Champanhe Técnica
<b>ROSA</b>	<i>Rate of Optimal Steam Application</i>
<b>RN</b>	Rolha Neutrocork
<b>SIPOC</b>	<i>Supplier, Inputs, Process, Outputs, Customers</i>
<b>SS</b>	<i>Sum Square</i>
<b>SS<sub>B</sub></b>	<i>Sum Square Between</i>
<b>SS<sub>W</sub></b>	<i>Sum Square Within</i>
<b>TI</b>	<i>Texas Instruments</i>
<b>TQM</b>	<i>Total Quality Management</i>
<b>TCA</b>	<i>2,4,6-Trichloroanisole</i>
<b>TT</b>	<i>Twin-Top</i>
<b>UI</b>	Unidade Industrial
<b>VOC</b>	<i>Voice Of Constumer</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Desvio padrão da população
$S$	Desvio padrão da amostra
$W_i$	Peso de cada critério
$r_{ij}$	Valor normalizado para a alternativa $i$ e critério $j$
$v_{ij}$	Valor normalizado ponderado
$A^+$	Melhor solução
$A^-$	Pior solução
$D_j^+$	Distância euclidiana à melhor solução
$D_j^-$	Distância euclidiana à pior solução
$C_j^+$	Proximidade relativa à melhor solução
$\bar{X}$	Média da amostra
$\mu$	Média da população
$\hat{\mu}$	Média estimada da população
$S_p^2$	Variância combinada
$Z$	Variável normal reduzida
$t$	Variável da distribuição t-student
$\nu$	Graus de liberdade
$\alpha$	Nível de significância
$p$	Proporção de defeituosos
$\hat{p}$	Proporção de defeituosos combinada
$\bar{p}$	Proporção média de defeituosos
$n$	Dimensão da amostra

$R$	Amplitude da amostra
$\bar{R}$	Amplitude média
$A_2$	Parâmetro da carta de controlo
$D_3$	Parâmetro da carta de controlo
$D_4$	Parâmetro da carta de controlo
$\tau_i$	Parâmetro correspondente ao efeito do nível $i$
$\varepsilon_{ij}$	Variável aleatória normalmente distribuída com valor nulo e variância constante
$\bar{Y}$	Média dos valores da resposta
$e_{ij}$	Resíduo
$(S/N)_i$	Índice Sinal-Ruído
$\chi$	Variável da distribuição do qui-quadrado
$k$	Número de classes
$C_n$	Número de critérios de seleção
$S_m$	Número de potenciais soluções
$P_{S_m}$	Ponderação da solução $m$
$I_{S_m}$	Importância da solução $m$
$T$	<i>Target</i> - valor nominal do processo
$F$	Variável da distribuição de Fisher
$h$	Altura do "armazém"

## INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo expor quais as motivações para o desenvolvimento do tema, quais os objetivos e metodologia utilizada para a realização do estudo. No final será feita uma pequena abordagem à estrutura do documento, referindo, brevemente, o conteúdo de cada capítulo.

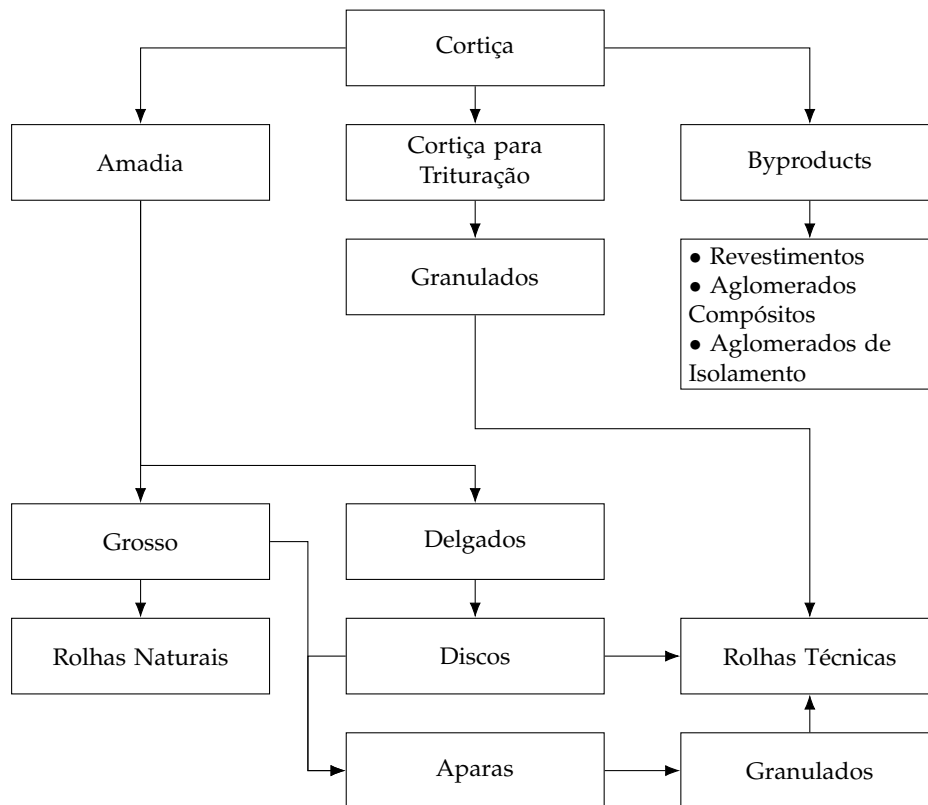
### 1.1 Enquadramento, Motivação e Justificação do Tema

Nos últimos cinco anos as exportações portuguesas de produtos de cortiça têm vindo a aumentar inequivocamente. Em 2014 apuraram-se 846 milhões de euros que representa um aumento de 1.5 % face a 2013 o que corrobora a linha de crescimento encetada desde o ano 2010 (APCOR, 2015a). Deste modo, Portugal lidera a lista de países exportadores de produtos de cortiça abrangendo cerca de 49.6 % do mercado mundial.

De facto, o sobreiro ocupa cerca de 716 mil hectares, representando 34 % do território português, o que faz com que seja a segunda espécie florestal nacional (APCOR, 2015b).

A cortiça é um produto de excelência, as suas características naturais permitem que tenha grande resistência ao desgaste, um coeficiente de atrito elevado e um grande poder vedante. O que faz com que o principal setor de destino dos produtos de cortiça seja a indústria vinícola que absorve 70 % da produção total. Contudo, a cortiça pode ser utilizada em diversas áreas, desde as rolhas de cortiça a isolamentos para a construção civil, esta versatilidade permitem que se consiga um aproveitamento quase total desta matéria prima. Atente-se no fluxo produtivo apresentado na Figura 1.1.

Como se verifica, existe um grande aproveitamento de toda a matéria prima, sendo que o desperdício de um processo produtivo pode ser reaproveitado noutro processo produtivo. Esta versatilidade apresenta-se como uma vantagem, contudo pode levar a um menor rigor no controlo e na melhoria dos processos, pois mesmo que se produza



Adaptado de (Corticeira Amorim, 2016)

Figura 1.1: Fluxo produtivo da cortiça

produtos não conformes existe sempre a possibilidade de serem reutilizados noutros processos para fazer outros produtos.

Atualmente, existe a necessidade das empresas produzirem produtos conformes à primeira, sob pena de serem ultrapassados pela concorrência. Neste sentido, o estudo apresentado nesta dissertação contempla a melhoria de um processo da indústria corticeira, a Moldação, reduzindo a variabilidade e harmonizando os seus resultados.

Para tal, este estudo recorre ao Seis Sigma enquanto metodologia e métrica, utilizando o ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) como linha de raciocínio do projeto.

O Seis Sigma, enquanto estratégia, pretende monitorizar processos, mantendo-os estáveis e sob controlo, atuando nas causas de variação, com o intuito de reduzir o número de unidades produzidas não conformes. Enquanto métrica, pretende quantificar os desvios da média do processo que aumentam a probabilidade de produzir unidades fora dos limites de especificação. Em última instância, um processo é Seis Sigma quando produz menos de 3.4 DPMO (defeitos por milhão de oportunidades).

## 1.2 Objetivos

É objetivo desta dissertação aprofundar o conhecimento científico sobre o Seis Sigma nas suas vertentes de metodologia, métrica e sistema de gestão. Pretende-se explorar as várias etapas do ciclo DMAIC utilizando as diversas técnicas de cada fase.

Com base no conhecimento do Seis Sigma, deseja-se encontrar e implementar ações de melhoria que visem reduzir a variabilidade e a produção de produtos não conformes por parte do processo produtivo Moldação. A Moldação fabrica Rolhas Técnicas, aglomerando granulados de cortiça para a produção de Rolhas Aglomeradas.

Como objetivo final espera-se, que após as soluções encontradas e implementadas o nível sigma, para a proporção de defeituosos, aumente e que vá de encontro à meta proposta no início do estudo, sendo o indicador de desempenho escolhido a proporção de defeituosos produzidos pelo processo de Moldação.

## 1.3 Metodologia de Investigação

A metodologia utilizada na realização desta dissertação foi composta por dois momentos que se complementam.

Numa primeira fase, definido o âmbito da dissertação, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o Seis Sigma, procurando perceber o seu contexto, história e como a conjugação de diversas ferramentas da qualidade resultavam em tão bons resultados na resolução de problemas.

Numa segunda fase, surgiu a oportunidade de integrar os conhecimentos já adquiridos num contexto de prática profissional, através da realização de um estágio na Corticeira Amorim, SGPS, S.A, mais concretamente na Unidade Industrial Equipar, sediada em Coruche. Foi então necessário alargar a revisão bibliográfica de forma a conseguir um melhor enquadramento entre o Seis Sigma e a indústria e especificamente o processo que iria ser alvo de estudo.

Enquanto metodologia para a resolução do caso de estudo, a dissertação baseou-se no ciclo DMAIC onde, de uma forma estruturada, se consegue integrar da melhor maneira, as corretas ferramentas da qualidade para a concretização dos objetivos pretendidos em cada uma das suas fases.

- *Define* - Definir o problema, declarar os objetivos e quantificar os benefícios esperados, estabelecer a equipa de projeto.
- *Measure* - Organização dos dados existentes e recolha de novos dados, quantificação do problema com as métricas adequadas, revisão dos objetivos propostos.
- *Analyze* - Analisar os dados recolhidos, identificar e organizar as causas potenciais do problema.

- **Improve** - Gerar ideias para soluções potenciais do problema, aplicar ações de melhoria que visem reduzir as causas do problema em estudo.
- **Control** - Elaboração de ferramentas que possibilitem uma monitorização e controlo do processo ao longo do tempo.

É possível ver uma representação esquemática da metodologia seguida na Figura 1.2.

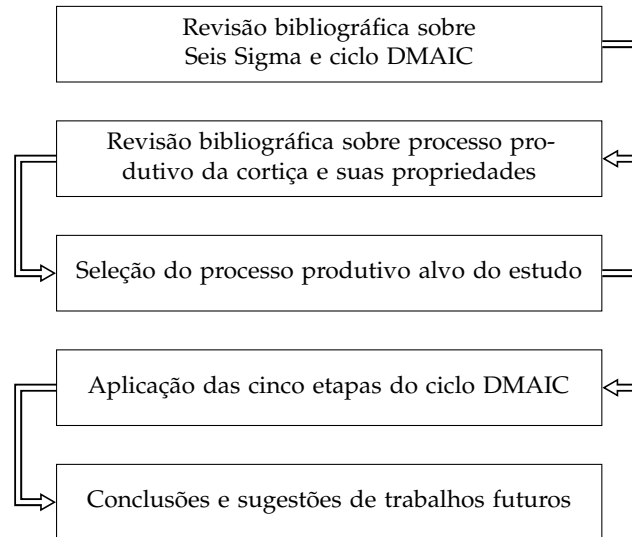


Figura 1.2: Esquema da abordagem ao caso de estudo

### 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, encontrando-se no final os anexos referentes ao trabalho realizado. O primeiro capítulo está reservado à introdução, o segundo e o terceiro abordam a revisão da literatura, o quarto contextualiza a organização, o quinto expõe o trabalho realizado no caso de estudo e por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões gerais e recomendações de trabalhos futuros. Numa abordagem mais aprofundada ao conteúdo presente em cada capítulo:

- **Capítulo 1 - Introdução**
  - Introdução aos conteúdos abordados, motivações, objetivos e enquadramento do tema, metodologia aplicada e organização do documento.
- **Capítulo 2 - Qualidade**
  - Evolução histórica da Qualidade, contextualização das várias definições para o conceito de Qualidade.
- **Capítulo 3 - Seis Sigma**
  - Abordagem detalhada ao Seis Sigma, origem, história, evolução, conceito, objetivo, as várias dimensões, ciclo DMAIC e explicação de cada uma das suas fases, algumas técnicas e ferramentas da qualidade utilizadas.

- **Capítulo 4 - Apresentação da Empresa**

- Apresentação da empresa que acolheu o estágio que deu origem à tese, breve explicação do processo produtivo geral, explicação detalhada do processo alvo do caso de estudo.

- **Capítulo 5 - Caso de Estudo**

- Escolha do âmbito do estudo, implementação do ciclo DMAIC auxiliado pelas técnicas e ferramentas da qualidade, implementação de melhorias, sugestões para o controlo do processo.

- **Capítulo 6 - Conclusão**

- Conclusões gerais do estudo, sugestões para trabalhos futuros.





## QUALIDADE E SEIS SIGMA

A satisfação dos clientes tem vindo a ganhar cada vez mais importância na estratégia das organizações tanto na indústria como nos serviços. Tal paradigma está intrinsecamente ligado ao conceito de Qualidade. Organizações que consigam manter a satisfação dos seus clientes melhorando e controlando a Qualidade têm apresentado vantagens competitivas sobre os seus concorrentes (Montgomery & Woodall, 2008).

Uma das recentes definições de Qualidade aponta para a redução da variabilidade. Nesse sentido, o Seis Sigma tem vindo a adquirir cada vez mais notoriedade, estabelecendo-se mundialmente como a metodologia para melhoria de processos com melhores resultados (Lunau et al., 2008). Para tal, o Seis Sigma utiliza uma extensa lista de ferramentas, um rigoroso uso da estatística e ferramentas matemáticas, que combinadas com a correta metodologia produzem resultados significativos (Raisinghanil, 2005).

Assim, no presente capítulo, começar-se-á por fazer uma contextualização histórica da evolução do conceito de Qualidade, bem como as várias dimensões que foi adquirindo ao longo dos tempos. Numa segunda parte do capítulo, será feita uma abordagem ao Seis Sigma, à sua origem, à sua evolução e particularizar-se-á o conceito em todas as suas vertentes, enquanto métrica, metodologia e sistema de gestão. Por fim, será feita uma breve introdução às técnicas e ferramentas da qualidade utilizadas na realização do presente estudo.

### 2.1 Qualidade

#### 2.1.1 Definição do conceito de Qualidade

Desde sempre que encontrar uma definição concreta para Qualidade foi uma tarefa complicada. Price (2003), defende que tal dificuldade prende-se, logo à partida, pela palavra em si. Atualmente, de acordo com o dicionário de *Oxford*, Qualidade tem significado de

"o padrão de algo quando comparado com os seus semelhantes; quão bom ou mau é algo", é definido também como sinónimo de excelência tratando-se um "padrão elevado" (Oxford Dictionary, 1989) . Não obstante, ao longo do tempo o conceito de qualidade foi apresentando múltiplos significados, fruto da evolução do conhecimento e das exigências dos mercados.

Nesse sentido, Yong e Wilkinson (2002) apresentam uma revisão bibliográfica profunda sobre as varias dimensões que o conceito de qualidade foi tomando, dividindo-as em quatro eras distintas.

#### 2.1.1.1 Qualidade enquanto excelência

Esta definição deriva da palavra grega "*arete*" que tem o sentido de superioridade ou ser o melhor. Neste contexto, alguns autores contribuíram com a sua definição de qualidade enquanto excelência conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Qualidade enquanto excelência

Autor	Definição de Qualidade
Garvin	Trata-se de "uma marca de padrões inflexíveis e alto desempenho" no entanto a qualidade não têm uma "definição concreta", trata-se de uma "propriedade de difícil análise que se aprende a reconhecer apenas através da experiência" (Garvin, 1988).
Pirsing	Qualidade é uma "excelência inata" sendo o conceito de qualidade intemporal e duradouro, sendo algo que se eleva acima de gostos ou estilos pessoais (Pirsig, 1974).
Tuchman	Qualidade é o investimento dos melhores recursos possíveis para produzir os melhores resultados possíveis. Está a atingir ou a chegar ao mais alto padrão contrariando o desleixo ou fraudulência (Tuchman, 1980).

Porém, Yong e Wilkinson (2002) defendem que esta dimensão de Qualidade enquanto excelência foi utilizada em campanhas de *marketing* para atrair clientes, sendo que dá poucas indicações a quem está na linha de produção. Deste modo, a interpretação do conceito deve ser mais pragmático, mais objetivo e mais tangível para que permita aos gestores conseguirem melhorar os processos. Outra desvantagem de definir qualidade enquanto excelência é que pode não ser guiado para o cliente, mas sim guiado para o fornecedor, visto que muitas vezes os consumidores associam o preço do produto à qualidade do mesmo.

#### 2.1.1.2 Qualidade enquanto valor

Esta dimensão de Qualidade está diretamente ligada com o preço de custo. De acordo com esta definição um produto de qualidade tem um determinado desempenho ou requisitos

em função do seu preço. Apresentam-se na Tabela 2.2 alguns autores que defendem esta dimensão de Qualidade.

Tabela 2.2: Qualidade enquanto valor

Autor	Definição de Qualidade
Feigenbaun	Qualidade está intrinsecamente ligado às exigências do cliente. Estas exigências estão diretamente ligadas ao binómio a necessidade do produto (a), contra o preço de venda do produto (b). A qualidade do produto não pode ser independente do seu custo (Feigenbaun, 1983).
Abbott	Anexar um preço a um produto faz com que a melhor oferta ganhe vantagens competitivas no mercado. Contudo, um bom negócio depende diretamente da qualidade e do preço do produto, estes dois fatores combinados influenciam a escolha do consumidor. Apenas quando as diferenças de qualidade são eliminadas pela criação de padrões é que o "mais barato" coincide com o "melhor" (Abbot, 1955).

Assim, um produto com um preço demasiado caro, mesmo que o preço se justifique, não pode ser um produto de qualidade, uma vez que o seu mercado alvo será diminuto. Reeves e Bednar (1994) afirmam que para agregar valor nos seus produtos, a indústria deve-se concentrar tanto na "eficiência interna" como na "efetividade externa" do seu produto, isto é, devem produzir em conformidade com as especificações internas que vão de encontro às expectativas externas dos consumidores. Deste modo, uma definição de qualidade baseada em valor permite perceber qual o comportamento do consumidor no momento da decisão entre vários produtos, sendo este um indicador da recetibilidade dos consumidores a determinados produtos.

No entanto, definir Qualidade como valor tem vantagens mas é difícil de aplicar na prática. Valor mistura dois conceitos distintos: excelência e "valer a pena". Isto resulta num conceito muito subjetivo que carece de limites bem definidos (Garvin, 1988).

### 2.1.1.3 Qualidade enquanto conformidade com as especificações

Definir Qualidade como conformidade com as especificações é um conceito direcionado para o fabrico. Isto implica que uma vez definida a especificação, qualquer desvio durante a produção significa uma redução de qualidade. Esta definição de qualidade tem vindo a mostrar-se apenas focada internamente e com o único objetivo de reduzir custos para a organização.

Todavia, esta definição pode ser enganadora, visto focar-se na especificação de qualidade definida pelo produtor. Esta especificação pode não ir de encontro às necessidades do consumidor. Nessa perspetiva, Juran define qualidade como apresentado na Tabela 2.3.

Esta definição de Qualidade é útil em casos onde seja fácil a criação de padrões e requisitos específicos. Contudo, esta definição, fora do contexto industrial é de difícil

Tabela 2.3: Qualidade enquanto conformidade com as especificações

Autor	Definição de Qualidade
Juran	Qualidade é a junção de dois conceitos: qualidade do <i>design</i> e qualidade da conformidade. O primeiro mede a capacidade do produto satisfazer as necessidades do consumidor enquanto o segundo indica se o produto cumpre com as especificações definidas (Juran, 1954).

aplicação uma vez que nem sempre é fácil traduzir as necessidades dos consumidores em especificações.

Por outro lado, a avaliação final da qualidade por parte do consumidor vai para além do cumprimento das especificações. Isto é, a satisfação do cliente está muitas vezes ligada à competência do vendedor, à embalagem do produto ou o serviço de pós-venda. Isto conduz a uma nova dimensão de Qualidade que excede as exigências do cliente.

#### 2.1.1.4 Qualidade enquanto superação das expectativas do cliente

Esta definição de Qualidade, em que não chega cumprir as exigências do cliente mas tem que se superar as expectativas, é atualmente a definição de Qualidade utilizada, com um sentido mais amplo. Foram adicionados novos fatores, tais como: cliente, utilizador ou mercado.

Tabela 2.4: Qualidade enquanto superação das expectativas do cliente

Autor	Definição de Qualidade
Feigenbaun	Todo o processo de fabrico de um produto ou fornecimento de um serviço tem que ir de encontro às expectativas do consumidor. Desde o <i>marketing</i> à manutenção (Feigenbaun, 1983).
Deming	Qualidade prevê o desenvolvimento de práticas de trabalho fiáveis que são congruentes com a entrega de produtos ou serviços a baixo custo com qualidade que satisfaça o mercado (Deming, 1986).
Buzzell & Gale	Qualidade é "o que o cliente disser, é, a qualidade de um produto ou serviço concreto é o que o cliente quiser que seja"(Buzzell & Gale, 1987).

Particularmente, este conceito mais amplo de Qualidade faz com que as organizações estejam mais focadas nas mudanças do mercado, utilizando vários sistemas de monitorização da satisfação do cliente. Contudo, as expectativas dos clientes estão em constante mudança, o que obriga a que haja maior perceção da evolução e quais serão as expectativas dos clientes no futuro.

De facto, este conceito de Qualidade focado no cliente trouxe alguma pressão às organizações que começaram a ter especial atenção em atributos como cortesia, atenção,

confiança e apresentação dos vendedores. No entanto, este conceito mais amplo de Qualidade é pouco mensurável, e bastante subjetivo. Isto é, cada cliente tem uma expectativa própria e o que satisfaz um tipo de cliente pode não satisfazer outro.

Concluindo, não existe uma definição concreta de Qualidade e nenhuma definição é melhor do que outra, todavia hoje em dia as organizações procuram utilizar um conceito de Qualidade mais focado no cliente.

Não obstante de todas as definições de Qualidade, Montgomery (2009) apresenta uma "definição moderna" de Qualidade dizendo "Qualidade é inversamente proporcional à variabilidade". Este novo paradigma introduz conceitos estatísticos na definição de Qualidade. Montgomery (2009) exemplifica esta definição com um exemplo de uma construtora de automóveis norte americana que comparou a fiabilidade de transmissões fabricadas nos Estados Unidos e num fornecedor japonês.

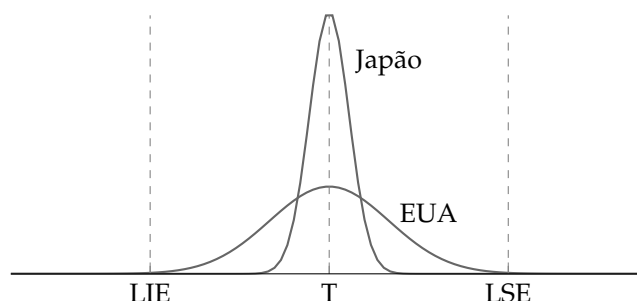


Figura 2.1: Diferença de variabilidade

Como apresentado na Figura 2.1 ambas as distribuições estão centradas no valor alvo (*target*), contudo a distribuição que representa o fabricante dos Estados Unidos da América (EUA) tem maior variabilidade o que faz com que, estando mais perto dos limites de especificação, tenha maior tendência em produzir unidades não conformes, em contraste com a distribuição que representa o fornecedor do Japão.

Neste sentido, a utilização de ferramentas e metodologias que visam a redução da variabilidade ganham maior expressão, como é o caso do Seis Sigma.

### 2.1.2 Evolução Histórica da Qualidade

O conceito de Qualidade foi e sempre será intrínseco à natureza humana. Não havendo uma data concreta do seu início, Pereira e Requeijo (2012) defendem que as civilizações mais primitivas já tinha algumas práticas que se inserem no contexto da Qualidade, falando do cuidado do Homem em executar bem o seu trabalho, tendo em atenção a escolha dos materiais mais adequados ou das ferramentas mais apropriadas ao trabalho.

Um bom exemplo disto são as pirâmides do Egito que tiveram em conta aspetos relacionados com normalização do trabalho, metrologia e controlo da qualidade, aquando da sua construção.

Ainda assim, o conceito de Qualidade começou a ser fortemente desenvolvido quando se estabeleceu uma relação comercial entre o produtor e o cliente. Apresenta-se de uma forma resumida os principais marcos na evolução da Qualidade e os motivos preconizadores dessa evolução na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Evolução Histórica da Qualidade

Época	Acontecimento
Séc. XIII até Séc. XIX	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Artesãos na Europa medieval organizam-se em sindicatos que criam critérios para avaliação da qualidade dos produtos (ASQ, 2016) .</li> <li>✓ Produtos que passavam nos critérios eram marcados com uma marca ou símbolo que era prova de qualidade.</li> </ul>
Séc. XVIII	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Com a Revolução industrial surgem as primeiras fábricas que tornam obsoletas as tradicionais unidades artesanais.</li> <li>✓ Antigos artesãos passam a desempenhar funções fabris e passam a haver inspetores que reportam aos supervisores de produção.</li> </ul>
Final Séc. XIX	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ A produção em massa faz com que os preços desçam, aumentando a procura e alargando o mercado a vários estratos sociais.</li> <li>✓ Taylor desenvolve a sua ideia de especializar o trabalho dividindo-o em tarefas, aumentando assim a produtividade.</li> <li>✓ Aumento da produtividade conduziu a menor qualidade. Para combater este facto foram criados departamentos autónomos de inspeção.</li> <li>✓ Responsabilidade da qualidade passa a ser dos gabinetes e não da produção.</li> </ul>
1ª Guerra Mundial (1914-1918)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ O fabrico de equipamentos militares assume um papel preponderante.</li> <li>✓ Falhas ocorridas no armamento levam à avaliação das suas respetivas causas.</li> <li>✓ Criam-se departamentos gigantescos de inspeção para verificar se os equipamentos militares estavam dentro das especificações.</li> </ul>
Entre as duas grandes guerras	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Incluiu-se o conceito de "processo" na qualidade</li> <li>✓ Houve um desenvolvimento de técnicas estatísticas que auxiliaram o controlo de qualidade</li> <li>✓ Shewhart deu um contributo notável à qualidade enquanto disciplina científica, ao introduzir conceitos como causas comuns e causas especiais de variação (Shewart, 1931).</li> <li>✓ Dodge e Roming desenvolvem a amostragem por aceitação, como alternativa à inspeção a 100%.</li> <li>✓ O contributo dos estudos de Shewhart, Dodge e Roming não têm grande impacto na maioria das empresas, que continuam preocupadas apenas com o aumento da produção e dos lucros (Pereira &amp; Requeijo, 2012).</li> </ul>
2ª Guerra Mundial (1939-1945)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ São adotadas novas formas de gestão da produção baseadas na normalização, definição de especificações técnicas, gestão de encomendas e melhorias que conduzissem ao aumento da produção.</li> </ul>

Tabela 2.5 – Evolução Histórica da Qualidade (continuação)

Época	Acontecimento
Após 2ª Guerra Mundial	<p>✓ A procura intensifica-se e as organizações voltam a relegar a qualidade para um plano secundário em detrimento da quantidade produzida.</p> <p>✓ Em 1946 é fundada a <i>American Society for Quality Control</i> (atual <i>American Society for Quality</i>), com sede em Milwaukee, nasceu da vontade de alguns especialistas da qualidade e fabricantes sustentarem os avanços efetuados durante o período de guerra (ASQ, 2016).</p> <p>✓ A fiabilidade dos produtos ganha uma importância que outrora não tinha, originando vários estudos baseados em métodos estatísticos (Dhillon, 1999).</p> <p>✓ Japão atravessa uma grave crise económica e social, fruto do escassos recursos de matérias primas, posição geográfica e sanções resultantes da guerra.</p> <p>✓ Japão adota estratégias baseadas no fabrico de produtos a baixo custo mas de alta qualidade com intuito primordial da exportação.</p> <p>✓ Feigenbaum introduz o conceito de Qualidade Total, entendido como sistema de gestão. Onde a Qualidade passa a ser responsabilidade de todas as partes envolvidas no fabrico do produto (Feigenbaum, 1983).</p>
Década de 70	<p>✓ A Europa passa por um período de forte evolução científico-tecnológica, que conduziu a novas reflexões sobre o conceito de Qualidade.</p> <p>✓ A qualidade dos métodos de trabalho, o desenvolvimento de documentação de suporte e a definição de métodos de controlo adequados ganham maior ênfase.</p>
Década de 80	<p>✓ A criação de mercados alargados facilitou a disseminação dos produtos por todo o mundo o que conduziu a uma maior competitividade internacional levando a um aumento substancial dos produtos oferecidos no mercado.</p> <p>✓ Consequentemente, o consumidor aumentou a exigência visto as suas exigências passarem a ser inteiramente satisfeitas, o que levou a que as empresas dessem maior atenção à fidelização dos clientes (Pereira &amp; Requeijo, 2012).</p> <p>✓ Para fazerem face a este novo paradigma as organizações passam a adotar a <i>Total Quality Management</i> (TQM) com objetivo de assegurar ou até exceder as expectativas dos clientes.</p>
Década de 90	<p>✓ No final da década de noventa a TQM já era mais que uma moda. Implementada por diversas organizações com sucessos visíveis.</p>
Início Séc XXI	<p>✓ Com a globalização e evolução tecnológica, nomeadamente a Internet, a qualidade de um produto ou serviço torna-se transparente para o cliente quase instantaneamente.</p> <p>✓ O tempo de vida de um produto diminuiu drasticamente com a constante evolução dos mercados.</p> <p>✓ O foco deixa de ser na gestão da qualidade mas sim na qualidade da gestão (Condi et al., 2003).</p> <p>✓ É necessário um novo ênfase sobre as ferramentas da qualidade para assegurar as expectativas dos clientes que estão em constante mudança (Condi et al., 2003).</p>

Alguns autores dividem a história da qualidade em eras. Dale (2003) e Dahlgaard et al. (2007) defendem a divisão em quatro eras distintas: era da inspeção, era do controlo estatístico da qualidade, era do controlo da qualidade total e a era da gestão da qualidade total. Por conseguinte, apresenta-se em síntese, as principais diferenças entre as respetivas eras na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: As quatro eras da Qualidade

	<b>Inspeção</b>	<b>Controlo Estatístico da Qualidade</b>	<b>Controlo da Qualidade Total</b>	<b>Gestão da Qualidade Total</b>
	(1800)	(1930)	(1950)	(1980)
<b>Preocupação Principal</b>	Deteção	Controlo	Coordenação	Impacto Estratégico
<b>Visão de Qualidade</b>	Resolução de problemas	Resolução de problemas	Resolução de problemas proativamente	Oportunidade competitiva
<b>Ênfase</b>	Uniformidade do produto	Uniformidade do produto com redução da inspeção	Toda a cadeia produtiva	O mercado e as exigências dos clientes
<b>Método</b>	Calibração e medição	Ferramentas e técnicas estatísticas	Programas e sistemas de controlo	Planeamento estratégico, definição de objetivos e envolvimento de toda a organização

Adaptado de (ZeePedia, 2016)

Por outro lado, outros autores procuram a melhor definição para uma nova era do conceito de Qualidade, a quinta era. Kaye e Dyason (1995) fizeram uma primeira abordagem a esse conceito realizando questionários a várias organizações. Assim, lê-se que "uma organização tem uma melhor qualidade quanto a sua capacidade de melhorar mais rápido que os seus concorrentes" e "já não chega satisfazer os clientes, as organizações têm que ser proativas na busca de novos clientes enquanto satisfazem os já existentes."

Finalizando, a Qualidade apresentou uma constante mudança durante o século passado. Apesar da dificuldade, o homem procurou sempre a sua definição mais correta, porém, o conceito de qualidade vai-se adaptando às necessidades da civilização ao longo dos tempos, não sendo um conceito estático e rigoroso. Por outro lado, com o "alongamento" da dimensão do conceito de qualidade, hoje em dia vive-se um pouco uma indefinição para qual a melhor definição de qualidade no contexto atual.



## 2.2 Seis Sigma

### 2.2.1 Origem do Seis Sigma

Na década de de setenta, do século passado, uma firma japonesa assumiu a gestão de uma fábrica da Motorola que produzia televisões nos Estados Unidos da América. Prontamente, adotaram medidas drásticas na forma como a fábrica operava, e rapidamente reduziram a taxa de defeitos em 20 vezes. O mais interessante é que a firma japonesa conseguiu tal feito utilizando a mesma mão de obra, tecnologia e modelos que já vigoravam, ao mesmo tempo que baixou o custo de produção, fazendo transparecer que o problema era a gestão da Motorola (Pyzdek, 2003).

Apesar das melhorias serem evidentes, apenas em 1986 é que Bob Galvin, CEO da Motorola, iniciou o conceito de Seis Sigma, que o notabilizou como um ícone no mundo dos negócios. Com o auxílio do engenheiro Bill Smith a Motorola estabeleceu o Seis Sigma como um objetivo da organização e uma meta para os processos e qualidade dos seus produtos. Estima-se que a redução de defeitos entre 1987 e 1993 foi na ordem dos 94 % (Montgomery & Woodall, 2008).

Não obstante, as raízes do Seis Sigma remontam ao século XVIII quando Carl Fredrick Gauss (1777-1855) introduziu o conceito de distribuição Normal e ao século XX quando Walter Shewhart defendeu que era aceitável variações na ordem dos três desvios padrões, para efeitos de controlo estatístico do processo (Raisinghani, 2005).

Em 1988 a Motorola ganha o prémio *Malcom Baldrige National Quality Award* e o seu "segredo" tornou-se publico a uma larga escala o que impulsionou de vez o conceito. Desde então, o Seis Sigma tornou-se um programa de melhoria da qualidade, redução de custos e expansão de mercados para produtos ou serviços.

Como se constata na Figura 2.2 a implementação do Seis Sigma teve um crescimento exponencial na primeira década. Hoje em dia o utilização do Seis Sigma na industria abrandou um pouco, contudo tem vindo a ganhar maior expressão em setores como a banca, saúde ou IT (Antony, 2007).

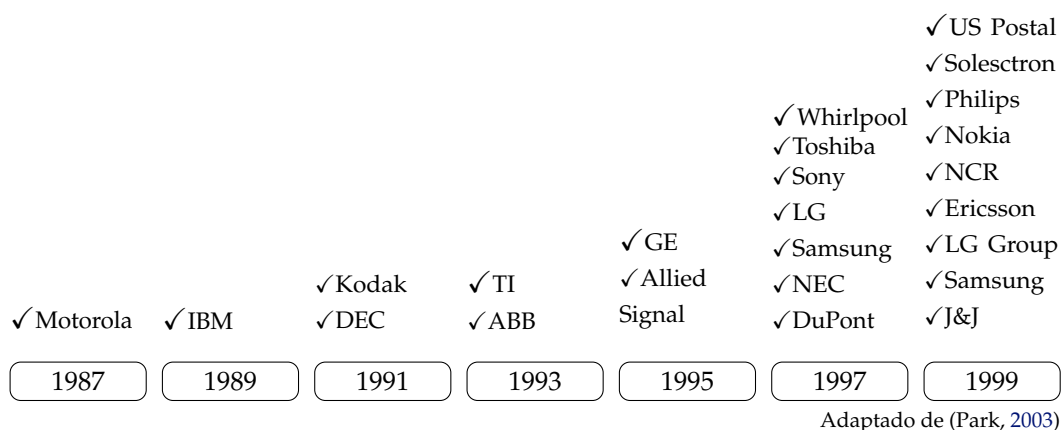


Figura 2.2: Implementação de Seis Sigma em organizações

O Seis Sigma tem evoluído ao longo do tempo, passou a ser mais do que um sistema de qualidade como é o TQM, por exemplo. É uma forma de encarar o mercado. Geoff Tennant diz que "é mais fácil fazer uma lista do que não é o Seis Sigma. Seis Sigma pode ser visto como: uma visão, uma filosofia, um símbolo, uma métrica, um objetivo, uma metodologia." (Tennant, 2001). Neste sentido, esta dificuldade de definição fez com que se possa dividir a evolução do Seis Sigma em gerações.

### 2.2.1.1 Gerações do Seis Sigma

Desde a sua origem reconhecem-se três gerações do Seis Sigma. Esta divisão acontece essencialmente devido à definição do âmbito, i.e., na Geração I o foco era apenas na eliminação de defeitos e a redução da variabilidade, na Geração II alargou-se um pouco o âmbito e deu-se maior ênfase à melhoria do produto e redução de custos e, por fim, na Geração III adicionou-se ao foco a criação de valor para todas as partes envolvidas na cadeia produtiva, desde a organização, aos fornecedores ou clientes. Na Tabela 2.7 apresenta-se, em resumo, as grandes diferenças entre as três gerações reconhecidas.

Tabela 2.7: Gerações do Seis Sigma

	Geração I	Geração II	Geração III
<b>Época</b>	1986 - 1993	1994 - 2001	2002 - presente
<b>Organizações Preconizadoras</b>	Motorola	General Eletric	Samsung
<b>Setor de aplicação</b>	Industria	Industria e Serviços	Industria e Serviços
<b>Âmbito</b>	Redução de defeitos Redução de variabilidade	Melhoria do produto Redução de custos	Criação de valor

Numa abordagem mais pormenorizada Montgomery (2005) defende que a criação de valor requer uma nova abordagem ao Seis Sigma e a utilização de novas ferramentas e técnicas. Nos últimos 75 anos as organizações criavam valor essencialmente pela eficiência das suas operações, no entanto esse foco incessante saturou essa oportunidade de melhoria. Atualmente a criação de valor passa pela criação de novos produtos, serviços ou novos mercados para os produtos existentes.

Neste sentido, o DFSS (*Design For Six Sigma*) terá um papel fundamental na mudança de paradigma para que as organizações criem vantagens competitivas (Montgomery, 2005).

### 2.2.2 Definição do Seis Sigma

Como referido anteriormente o conceito de Seis Sigma não é imediato. A par do conceito de Qualidade, a definição de Seis Sigma está em constante mudança de acordo com as

exigências do mercado. No entanto, diversos autores têm apresentado a sua interpretação de Seis Sigma, conforme se resume na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Revisão bibliográfica da definição de Seis Sigma

Autor	Ano	Definição do Seis Sigma
Blakeslee Jr.	1999	É uma abordagem de alta performance baseada em dados para analisar as causas dos problemas e resolve-los (Blakeslee Jr., 1999).
Hahn et al.	1999	É uma abordagem baseada na disciplina e estatística para melhorar o produto e a qualidade dos processos (Hahn et al., 1999).
Harry e Schroeder	2000	É um processo que permite às empresas melhorar, drasticamente, os seus resultados através da conceção e acompanhamento das atividades de negócio de forma a minimizar o desperdício e recursos enquanto aumenta a satisfação do cliente (Harry & Schroeder, 2005).
Sanders e Hild	2000	É uma estratégia de gestão que necessita de uma mudança cultural na organização (Sanders & Hild, 2000).
Pande et al.	2000	Um sistema abrangente e flexível, que permite sustentar e maximizar o sucesso da empresa. É impulsionado pelo conhecimento e compreensão das necessidades dos clientes, por um uso correto dos dados existentes, por uma análise estatística e uma cuidadosa atenção à gestão, melhorando e reinventando os processos da empresa (Pande et al., 2000) .
Antony et al.	2003	Melhorar o nível sigma através de uma aplicação rigorosa de ferramentas e técnicas estatísticas (Antony et al., 2003).
Linderman et al.	2003	É um método organizado e sistemático para melhoria estratégica de produtos ou serviços. Baseia-se em métodos estatísticos e científicos para reduzir drasticamente a proporção de defeitos (Liderman et al., 2003).
Park	2003	É um novo paradigma estratégico de gestão e inovação, que implica três coisas: estatística, estratégia de gestão e cultura focada na qualidade (Park, 2003).
Werkema	2004	É uma estratégia de gestão disciplinada e quantitativa. Tem o objetivo de aumentar o lucro das empresas, através da melhoria de qualidade dos processos e produtos e consequente aumento da satisfação dos clientes (Werkema, 2004).
Antony	2006	É uma medida que indica o desvio à média, do desempenho de uma determinada característica (Antony, 2006).
Schroeder, et al.	2008	É uma estrutura organizada para reduzir a variabilidade nos processos das organizações, recorrendo a especialistas que com um método estruturado e métricas definidas procuram alcançar os objetivos estratégicos propostos (Schroeder et al., 2008).
Pyzdek	2008	É uma implementação rigorosa e efetiva de técnicas de gestão que têm como objetivo atingir o desempenho livre de erros (Pyzdek, 2003).

Apesar de cada autor estabelecer a sua interpretação e definição do conceito de Seis Sigma, é possível encontrar três linhas de entendimento entre as diversas definições. O Seis Sigma baseia-se em três grandes pilares: medição, definição do objetivo e mudança cultural. Para tal, o Seis Sigma recorre a conceitos estatísticos, que lhe permitem quantificar e mensurar o estado de operação atual, que aliados a uma metodologia estruturada e uma

cultura de cumprimento e qualidade, tornam-se um meio poderoso na melhoria continua.

### 2.2.3 Benefícios esperados com a implementação do Seis Sigma

O Seis Sigma desde a sua génese tem vindo, constantemente, a evoluir e a ganhar dimensão e importância para o sucesso das empresas. Com ênfase na redução da proporção de defeituosos em produtos, processos ou serviços. Tem originado um aumento da satisfação do cliente, quota de mercado, redução de custos, aumento da produtividade, entre outros fatores, que trazem vantagens competitivas para as organizações (Gaspar, 2015).

Dusharme (2006) realizou um inquérito para aferir o impacto de diversas técnicas e ferramentas de gestão da qualidade como se apresenta na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: *Ranking* de técnicas de melhoria de processos

Ferramenta / Técnicas / Metodologias	Impacto (%)
Seis Sigma	53.6
Mapa de processo	35.3
Análise causa-efeito	31.3
ISO 9000	21.0
Índices de capacidade	20.1
Controlo Estatístico do Processo	20.1
Cartas de Controlo	19.2
Desenho de Experiências	17.4
Gestão pela Qualidade Total	10.3
Análise dos Fluxos de Processo	9.8

Adaptado de (Dusharme, 2006)

Como se verifica, o Seis Sigma é a metodologia de gestão que alcança melhores resultados. No entanto, é de notar que muitas das ferramentas apresentadas na Tabela 2.9 fazem parte das ferramentas base do Seis Sigma. Tal facto traduz uma vantagem para o Seis Sigma, pois combina da melhor forma uma série de ferramentas que quando aplicadas por si só não alcançam tão bons resultados (Kumar et al., 2008).

Os benefícios decorrentes da implementação do Seis Sigma nas organizações têm vindo a ser exaustivamente descritos na literatura. Contudo, nem sempre a forma de mensurar esses benefícios é igual, dependendo essencialmente do setor de atividade. Pode-se traduzir os proveitos provenientes do Seis Sigma em métricas tão diversas como redução de custos, melhoria da qualidade, melhoria da produtividade, rapidez de atendimento, entre outras. De modo a tornar mais perceptível este conceito Kwak e Anbari (2006) fazem uma distinção por área de atuação das organizações.

Como indicado na Tabela 2.10 a quantificação dos benefícios resultantes do Seis Sigma pode utilizar várias métricas e ser aplicado em áreas tão dispares como Indústria ou Saúde. Todavia, para alcançar tais patamares de excelência é necessário um empenho geral da organização, cumprindo com os fatores chave para o sucesso do Seis Sigma.

Tabela 2.10: Benefícios do Seis Sigma

Empresa	Setor	Métrica	Benefício
Motorola	Industria	Financeira	15 mil milhões de dólares americanos ao longo de 11 anos.
General Electric	Industria	Financeira	2 mil milhões de dólares americanos em 1999.
Raytheon	Industria	Tempo	Redução dos tempos de inspeção em 88%.
Hughes	Industria	Qualidade e Produtividade	Qualidade aumentou 1000% e produtividade 500%.
Bank of America	Banca	Satisfação do Cliente	10.4 % de melhoria da satisfação do cliente e redução de 24% em problemas com clientes (Roberts, 2004).
University of Texas MD	Saúde	Tempo	Redução do tempo de preparação das salas de exame de 45 min para menos de 5 min (Benedetto, 2003).
Bechtel Corporation	Construção	Financeira	Poupanças de 200 milhões de dólares americanos com um investimento de 30 milhões (Eckhouse, 2003).
W.R. Grace	Investigação e Desenvolvimento	Tempo	<i>Time-to-market</i> reduzido de 12 meses para 8 meses (Rajagopalan et al., 2004).

Adaptado de (Kwak &amp; Anbari, 2006)

### 2.2.4 Fatores chaves para o sucesso do Seis Sigma

Como descrito anteriormente o Seis Sigma pressupõe uma mudança cultural de toda a organização e um forte compromisso com os objetivos traçados. Alguns autores têm descrito na literatura a forma mais efetiva de implementar o Seis Sigma e quais os fatores chave para o seu sucesso. Nesse sentido, um estudo realizado no Reino Unido, concluiu que os aspetos que influenciavam o sucesso da implementação do Seis Sigma são (Antony & Banuelas, 2001):

- ✓ Compromisso e envolvimento dos gestores;
- ✓ Compreensão das metodologias, ferramentas e técnicas do Seis Sigma;
- ✓ Ligar o Seis Sigma à estratégia da empresa, clientes, fornecedores e recursos humanos;
- ✓ Correta seleção e planeamento dos projetos;
- ✓ Formação continua;
- ✓ Promover a mudança cultural.

Outros autores acrescentam alguns pontos aos já mencionados e reforçam os já existentes. Johnson e Swisher (2003) defendem que se deve escolher os líderes do projeto

cuidadosamente, criando sempre expectativas claras e objetivas. Do mesmo modo, Starbird (2002) acentua o papel dos líderes e acresce a necessidade da criação de relatórios frequentes contendo, listas de oportunidades, estado das tarefas em execução ou resultados das tarefas já terminadas. Assim, identificando corretamente os aspetos a ter em conta para o sucesso da implementação do Seis Sigma, é de esperar que muitas organizações continuem a procurar o Seis Sigma enquanto sistema principal para a gestão da qualidade (Kwak & Anbari, 2006).

Não obstante, Kumar et al. (2008) apresentam uma relação entre o rendimento de um processo e o seu nível de qualidade sigma. Conforme apresentado na Figura 2.3 o rendimento aumenta consoante o nível sigma aumenta, no entanto quanto maior for o nível sigma, menor será o acréscimo de rendimento. Deste modo, ainda que os benefícios da implementação do Seis Sigma sejam conhecidos, cabe aos gestores analisar a viabilidade dos projetos e perceber se o retorno será superior ao investimento necessário.

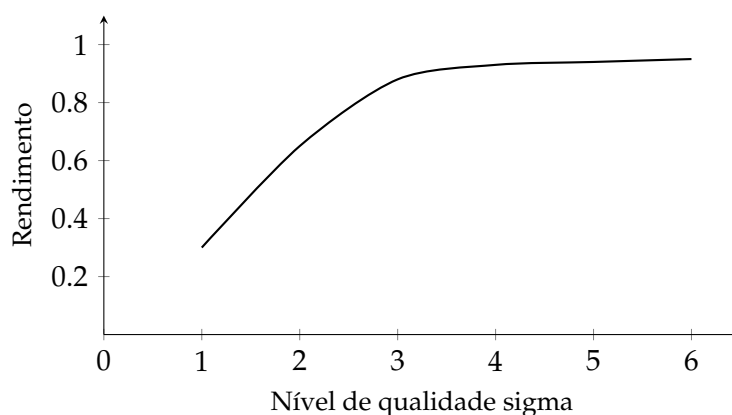


Figura 2.3: Relação entre o rendimento e o nível sigma

### 2.2.5 As várias dimensões do Seis Sigma

Como apresentado em 2.2.2 não existe uma definição concreta do que é o Seis Sigma. A maioria dos autores, em ultima instância, refere-se ao Seis Sigma como um sistema de gestão. McCarty et al. (2005) sugerem que se deve rever primeiro o Seis Sigma enquanto métrica e metodologia para criar um contexto que facilite a compreensão do Seis Sigma enquanto sistema de gestão. Nesta secção será feita uma abordagem ao Seis Sigma como metodologia, métrica e como se podem combinar ambas as dimensões para atingir a excelência.

Como ilustrado na Figura 2.4, McCarty et al. (2005) consideram o Seis Sigma como metodologia que se baseia no ciclo DMAIC para analisar os processo a fim de eliminar as causas especiais de variação e desenvolver alternativas para eliminar ou reduzir erros. Para tal, baseia-se na métrica como ferramenta a ser aplicada no ciclo DMAIC, o que confere robustez ao Seis Sigma como metodologia para a resolução de problemas (Silva, 2013).

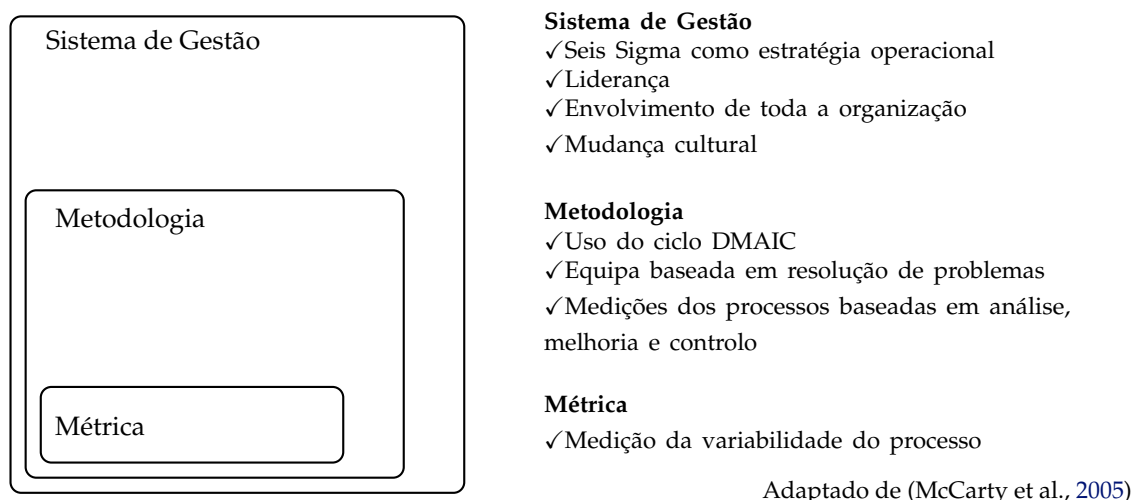


Figura 2.4: Seis Sigma enquanto métrica, metodologia e sistema de gestão

### 2.2.5.1 Seis Sigma enquanto métrica

Sendo um dos objetivos do Seis Sigma a redução de variabilidade das características da qualidade de um produto ou processo em torno de um valor alvo (*T-Target*), pressupõe-se que os limites de especificação se encontram a seis desvios padrão ( $\sigma$ ) da média do processo, e por sua vez esta se encontre centrada no valor alvo, considerando então, que o processo é caracterizado por uma distribuição Normal (Gaspar, 2015).

Algumas empresas baseiam-se apenas na métrica do Seis Sigma como medida de desempenho do processo, isto implica que um nível Sigma elevado indica uma menor taxa de defeitos enquanto, por outro lado, um nível Sigma baixo indique uma maior taxa de defeitos. Ainda assim, a métrica do Seis Sigma é um fiel aliado do ciclo DMAIC, permitindo estabelecer objetivos realistas, sendo uma ferramenta de referência, nomeadamente na fase *Measure* e *Control* (Kumar et al., 2008) (Silva, 2013).

Para um melhor entendimento do conceito de Seis Sigma enquanto métrica é necessário definir corretamente o que se entende por processo, variabilidade, limites de especificação, nível de significância e intervalo de confiança.

Um processo é um conjunto de interações entre elementos, que criam ou adicionam valor transformando entradas (*inputs*) em saídas (*outputs*) (Pinto, 2006). Qualquer processo de produção tem uma variabilidade inerente fazendo com que os dados de uma determinada característica da qualidade não tenham sempre o mesmo valor (Silva, 2013).

Entende-se por variabilidade a variação média dos valores medidos de uma determinada característica da qualidade influenciados por fatores de variação como o equipamento, a mão de obra ou o meio ambiente. As fontes de variação podem provocar alterações em intervalos de tempo mais curtos ou mais longos, neste caso as mudanças podem ser graduais (desgaste do equipamento), esporádicas (mudança de métodos) ou ainda ambientais. Assim, é fundamental identificar as causas de variação e agrupá-las em



dois grupos: causas comuns ou causas especiais (Pereira & Requeijo, 2012).

Quanto aos limites de especificação, são os valores limite pelos quais o processo ou produto satisfaz as exigências e necessidades dos clientes. Existem dois tipos de limites de especificação limite superior de especificação (LSE) e limite inferior de especificação (LIE). Quando um processo apresenta os dois limites diz-se que se está na presença de uma especificação bilateral enquanto será unilateral quando apenas apresentar um dos limites (Gaspar, 2015).

Por fim, em estatística, termos como nível de significância ou intervalo de confiança são muito presentes. Assim, entende-se por intervalo de confiança a região compreendida entre dois limites, um superior e outro inferior, considerando-se um nível de confiança de  $(1 - \alpha)$ . Por outro lado, nível de significância ( $\alpha$ ) é representado pelas áreas compreendidas além desses limites. Repare-se que quando o nível de confiança aumenta, o nível de significância diminui e vice-versa. Para melhor compreensão destes conceitos atente-se na Figura 2.5.

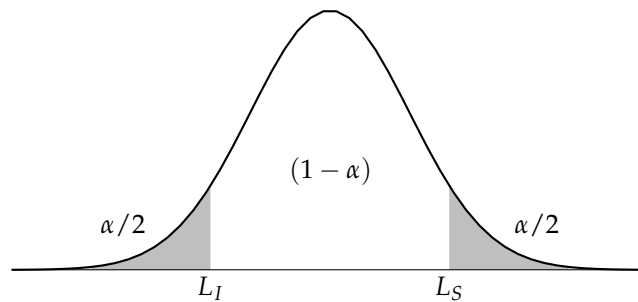


Figura 2.5: Distribuição Normal com zonas de rejeição bilaterais

### 2.2.5.2 Nível de qualidade Sigma

Tendo em conta os conceitos descritos anteriormente, quando os limites de especificação se encontram a três desvio padrão ( $\mu \pm 3\sigma$ ), indica que a probabilidade de um valor estar fora das especificações é de  $\alpha = 0.27\%$ . Note-se que a este valor  $\alpha$  se dá o nome de risco do produtor, entendendo-se como a probabilidade produzir um produto fora da especificação, que por sua vez indica que são produzidos 2700 DPMO, conforme apresentado na Tabela 2.11.

Repare-se ainda na Tabela 2.11 que à medida que o nível sigma aumenta e consequentemente os limites de especificação se afastam da média, verifica-se que o nível de confiança aumenta, pelo que o risco do produtor diminui.

O ideal seria que a média do processo se mantivesse centrada no valor alvo. Contudo, a longo prazo o processo está sujeito a fatores externos de variação, como o equipamento entre outros. Estas fontes de variação podem fazer com que existam desvios na média do processo, considerando a metodologia Seis Sigma um desvio até  $1.5\sigma$ , como se apresenta na Figura 2.7. Assim, um processo com um nível de qualidade  $6\sigma$  apresenta no máximo 3.4 DPMO, conforme se pode verificar pela Tabela 2.12.



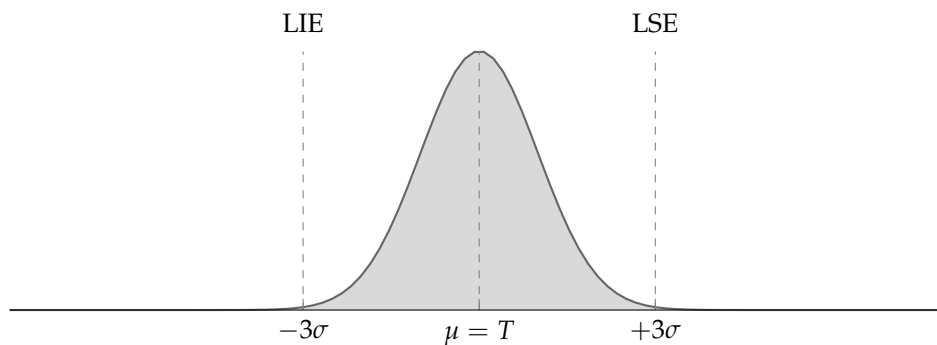


Figura 2.6: Distribuição Normal com a média centrada no valor alvo ( $\mu = T$ )

Tabela 2.11: DPMO com  $\mu = T$

Nível Sigma	Probabilidade de produtos dentro da especificação ( $1 - \alpha$ ) (%)	DPMO
$\pm 1\sigma$	68.27	317300
$\pm 2\sigma$	95.45	45500
$\pm 3\sigma$	99.73	2700
$\pm 4\sigma$	99.9937	63
$\pm 5\sigma$	99.999943	0.57
$\pm 6\sigma$	99.9999998	0.002

Adaptado de (Montgomery & Woodall, 2008)

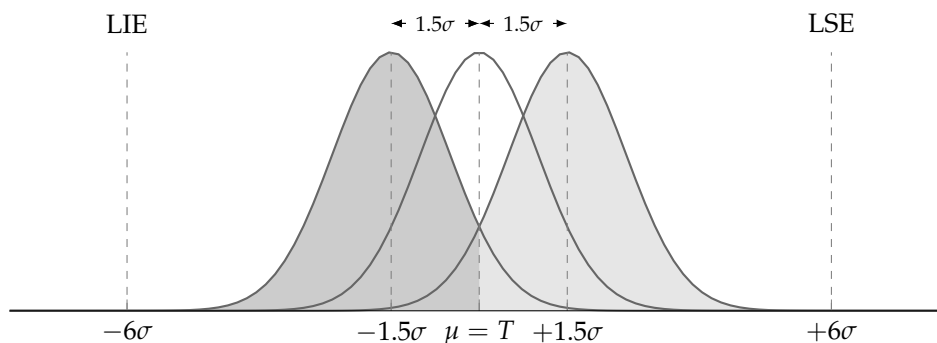


Figura 2.7: Distribuição Normal com desvios da média de 1,5 sigma ( $\mu = T \pm 1.5\sigma$ )

Tabela 2.12: DPMO com  $\mu = T \pm 1.5\sigma$

Nível Sigma	Probabilidade de produtos dentro da especificação ( $1 - \alpha$ ) (%)	DPMO
$\pm 1\sigma$	30.23	697700
$\pm 2\sigma$	69.13	608700
$\pm 3\sigma$	93.32	66810
$\pm 4\sigma$	99.3790	6210
$\pm 5\sigma$	99.97670	233
$\pm 6\sigma$	99.999660	3.4

Adaptado de (Montgomery & Woodall, 2008)

No entanto, este conceito que prevê desvios na média do processo tem sido alvo de controvérsia. Montgomery e Woodall (2008) descrevem que tem havido alguma discussão e que existe uma inconsistência, uma vez que apenas se podem fazer previsões quando um processo se encontra sob controlo estatístico, isto é a média e o desvio padrão permaneçam constantes ao longo do tempo. Assim, se existem desvios da média a previsão de 3.4 DPMO pode não ser muito fiável pois a média pode desviar mais do que  $1.5\sigma$ . Todavia, os autores defendem também, que nenhum processo ou sistema é verdadeiramente estável, por conseguinte deve-se olhar para o valor 3.4 DPMO como um objetivo a atingir focando-se na redução da variabilidade do processo e eliminação de desperdícios e defeitos.

Harry e Schroeder (2005) argumentam que, quando um processo apresenta um nível sigma baixo à partida, prevê-se um crescimento de  $1\sigma$  por ano sem grande investimento, porém, este crescimento não é constante. Os autores estimam que exista um patamar situado nos  $4.7\sigma$  onde o ritmo de crescimento abranda drasticamente. Assim, para passar desde patamar é necessário algum investimento e a utilização de novas metodologias como o DFSS (*Design For Six Sigma*), por exemplo. Note-se que este princípio vai de encontro ao exposto na Figura 2.3 onde o rendimento abranda drasticamente a partir de nível  $4\sigma$ .

### 2.2.5.3 Métricas baseadas em defeitos

Quando um produto não cumpre uma especificação, de uma determinada característica da qualidade, é chamado um produto defeituoso. Note-se que, o mesmo produto pode, simultaneamente, não satisfazer múltiplas especificações, pelo que, um produto defeituoso pode apresentar tantos defeitos quantas características da qualidade forem analisadas.

Neste sentido, as métricas do Seis Sigma baseadas em defeitos consideram o número total de oportunidades para a ocorrência de um defeito num produto, sendo utilizados com frequência termos como Defeitos por Unidade (DPU), Defeitos por Oportunidade (DPO) e Defeitos por Milhão de Oportunidades (DPMO), já referido anteriormente.

Assim, entende-se por DPU a média dos defeitos detetados por unidade de produtos observadas, como definido na Equação 2.1.

$$DPU = \frac{\text{Número de defeitos observados}}{\text{Número total de unidades inspecionadas}} \quad (2.1)$$

No entanto, esta métrica é pouco eficaz quando se quer comparar produtos. Ou seja, quanto maior a complexidade do produto maiores as oportunidades de ocorrência de defeitos pelo que, para um mesmo valor de DPU se pode tirar interpretações diferentes. Por exemplo, um DPU de 0.5 num automóvel indica menor taxa de defeitos que o mesmo valor de DPU para uma bicicleta, visto que uma bicicleta tem significativamente menos oportunidades para a ocorrência de defeitos que um automóvel (Gygi et al., 2005).

Por conseguinte, é necessário encontrar uma métrica que relacione o número de defeitos com o número de oportunidades para a existência de defeitos. Posto isto, surge

um novo conceito chamado DPO que é calculado com base na Equação 2.2.

$$DPO = \frac{DPU}{\text{Número de oportunidades para defeitos}} \quad (2.2)$$

Ainda assim, é necessário ter especial atenção a aferições feitas através da métrica DPO. Ora repare-se, o número de oportunidades para a ocorrência de defeitos é qualitativo, pelo que depende da interpretação de cada um, sobrevalorizando esse número, o valor de DPO desce rapidamente. Uma forma de contrariar esta imprecisão é extrapolar a métrica DPO para um número fixo de oportunidades de defeitos, como é o caso da métrica DPMO, que calcula o número de defeitos por milhão de oportunidades, como visto na Equação 2.3.

$$DPMO = DPO \times 10^6 \quad (2.3)$$

Definida uma métrica baseada em defeitos consistente, é necessário convertê-la no nível sigma correspondente, para tal utilizam-se tabelas de conversão como a Tabela A.1 apresentada no Anexo A.

#### 2.2.5.4 Seis Sigma enquanto metodologia

Apesar de McCarty et al. (2005) apenas considerar o Seis Sigma enquanto metodologia utilizando o ciclo DMAIC, existem outras abordagens mais profundas realizadas por outros autores. Grande parte dos autores defende que se deve diferenciar o Seis Sigma em duas metodologias distintas, Chakrabarty e Tan (2007) defendem que se deve distinguir a metodologia a utilizar consoante o processo em estudo, i.e., deve utilizar-se o Seis Sigma baseado no ciclo DMAIC para processos, produtos ou serviços que já existam ou o DFSS na implementação e conceção de novos produtos ou serviços a lançar no mercado. A metodologia DFSS baseia-se em diferentes ciclos como o DMADV (*Define, Measure, Analyze, Design, Verify*), DMADOV (*Define, Measure, Analyze, Design, Optimize, Verify*), ICOV (*Identify, Characterize, Optimize, Verify*), IDOV (*Identify, Design, Optimize, Validate*) entre outros.

Do mesmo modo, Liderman et al. (2003) diz que se deve utilizar o ciclo DMAIC como ferramenta de melhoria continua em processos já existentes, enquanto a metodologia DFSS deve aplicar-se a produtos ou serviços em fase de conceção e desenvolvimento, usando um dos demais ciclos já referenciados. Yang e El-Haik (2003) acrescentam que o DFSS é uma "nova onda" do Seis Sigma que se foca bastante na parte do planeamento e que tenta "fazer as coisas bem à primeira", contudo na opinião do autor o objetivo ultimo do DFSS é fazer as coisas certas e fazê-las corretamente sempre.

Por outro lado, Pyzdek (2003) defende que o DFSS é uma derivação do ciclo DMADV e apresenta uma abordagem metodológica que facilita na escolha do melhor modelo de Seis Sigma a ser utilizado em cada caso. Como demonstrado na Figura 2.8, apenas se distingue se o processo existe ou não, caso exista utiliza-se o ciclo DMAIC, caso ainda não exista recorre-se ao ciclo DMADV.

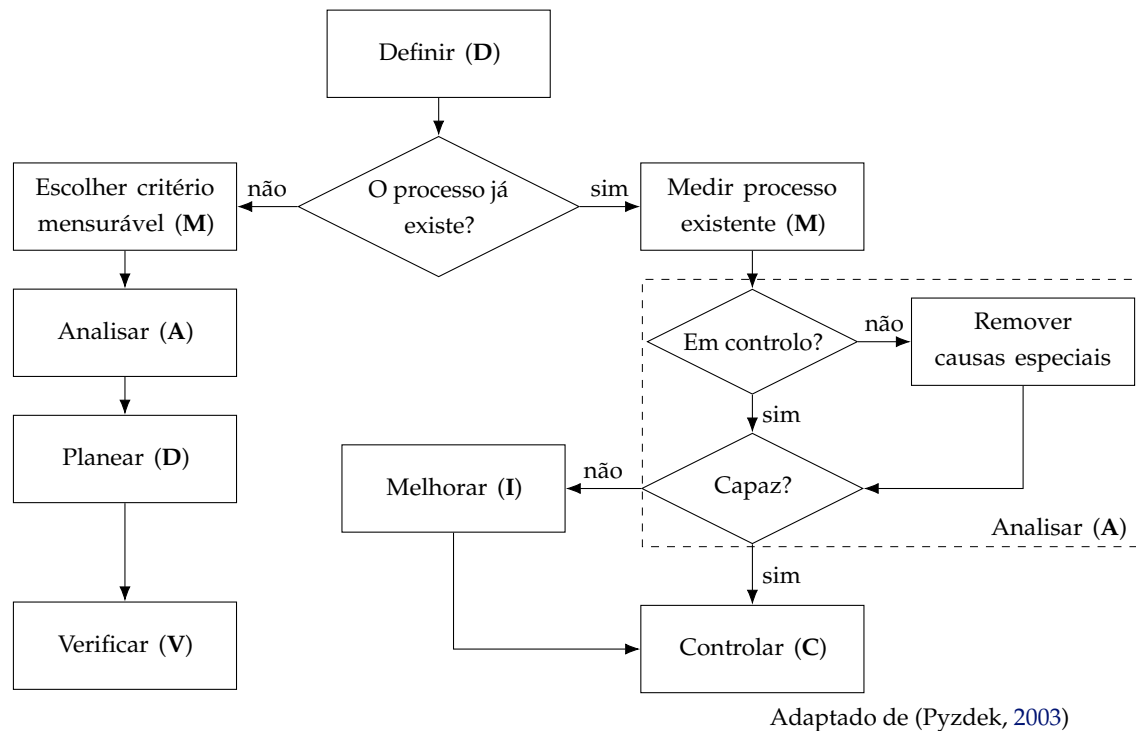


Figura 2.8: Metodologia para escolha do modelo Seis Sigma

Por último, é importante referir que qualquer que seja a metodologia aplicada, tem que haver um critério rigoroso de quais as ferramentas da qualidade mais adequadas com base na natureza do projeto.

### 2.2.5.5 Seis Sigma enquanto Sistema de Gestão

O Seis Sigma advém, essencialmente, de conceitos estatísticos, no entanto tem-se apresentado como uma excelente pratica na resolução de problemas. Apesar de fortemente baseado em conceitos científicos, o Seis Sigma deve ser interpretado como mais do que um sistema de resolução de problemas baseado em métricas (Emil et al., 2010).

Por um lado, as métricas do Seis Sigma são, de facto, um dos pilares do seu sucesso, porém são as decisões tomadas pela equipa Seis Sigma que sustentam esse sucesso. Sem essa gestão da tomada de decisão as métricas do Seis Sigma teriam apenas o valor simbólico de indicar o estado atual do processo. Por outro lado, a sua metodologia estruturada permite que as equipas Seis Sigma sigam uma linha de raciocínio fortemente direcionada para a resolução de problemas, utilizando variadas ferramentas científicas que facilitam tanto no tratamento dos dados, como na tomada de decisões. Por ultimo, devido à sua estrutura organizacional o Seis Sigma permite trazer até ao nível operacional os requisitos de todas as partes envolvidas na organização, desde as necessidades dos *stakeholders* até às necessidades dos colaboradores e clientes.

Concluindo, o Seis Sigma definido como sistema de gestão tem grande potencial, conjugando da melhor forma o Seis Sigma enquanto métrica e enquanto metodologia.

### 2.2.5.6 Estrutura organizacional do Seis Sigma

A aplicação do Seis Sigma numa organização requer vários níveis de competências. Desde pessoas capazes de resolver problemas que requerem conhecimentos profundos de estatística, até ao operador que faz a simples recolha de dados diária (Gygi et al., 2005). Por outro lado, é necessário uma integração e envolvimento de todos os elementos da equipa para que a implementação seja bem sucedida.

No final da década de oitenta, Mikel Harry, foi destacado pela Motorola para assistir a Unisys Salt Lake Printed Circuit Facility, onde trabalhou como consultor técnico, com o intuito de resolver um problema de produção de circuitos elétricos. Após a resolução desse problema, os gestores da Unisys quiseram destacar os engenheiros responsáveis por tal sucesso, foi então quando Mikel Harry, sugeriu chamar a estes engenheiros "engenheiros de cinturão negro" (iSixSigma, 2016). Nasceu, então, a hierarquia por cinturões (*Belt System*) que ainda hoje é utilizada nas diversas organizações Seis Sigma. Para uma melhor compreensão deste conceito atente-se na Figura 2.9 e Tabela 2.13.

Tabela 2.13: Funções dos intervenientes no Seis Sigma

Papel na hierarquia	Função no projeto
<i>Executive Leadership</i>	Fornecer o alinhamento global, estabelecendo o foco estratégico do programa Seis Sigma dentro do contexto da cultura e visão da organização (ASQ, 2016b).
<i>Champion</i>	Faz a ligação entre a gestão de topo e a equipa Seis Sigma. Remove barreiras organizacionais e fornece todos os elementos necessários à equipa Seis Sigma (Kubiak & Benbow, 2009).
<i>Master Black Belt</i>	Está a <i>full time</i> com a equipa Seis Sigma, sendo a sua principal função treinar e aconselhar os Black Belts, assim como liderar o rumo dos projetos de acordo com os objetivos estratégicos da organização (Kubiak & Benbow, 2009).
<i>Black Belt</i>	Têm conhecimentos profundos das ferramentas estatísticas a serem aplicadas nas diversas metodologias. Grande capacidade de liderança e trabalho em equipa para o sucesso do projeto (Kubiak & Benbow, 2009).
<i>Green Belt</i>	Trabalha sob a tutela dos <i>Black Belts</i> . Menor conhecimento das ferramentas estatísticas em toda a sua dimensão, mas com competência e treino para utilizar as ferramentas necessárias ao projeto (Kubiak & Benbow, 2009).
<i>Yellow Belt</i>	Pode ser qualquer elemento da organização, que entenda bem o processo em estudo, que consiga identificar as melhores métricas, definir fatores críticos e recolher alguns dados que auxiliem os <i>Green Belt</i> e <i>Black Belt</i> (Gygi et al., 2005).
<i>White Belt</i>	Elemento que não faz parte da equipa Seis Sigma mas que tem conhecimentos básicos que lhe possibilitam trabalhar em equipas de resolução de problemas locais que auxiliam no projeto global Seis Sigma (ASQ, 2016b).

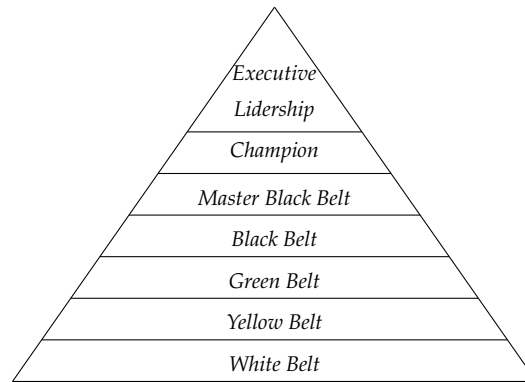


Figura 2.9: Hierarquia do Seis Sigma baseada em cinturões

### 2.2.6 Ciclo DMAIC

DMAIC é um acrónimo de cinco fases ligadas entre si: *Define, Measure, Analyze, Improve* e *Control* - Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar. Numa forma simplificada, o ciclo DMAIC começa por identificar e priorizar os potenciais projetos, faz a medição do desempenho dos parâmetros chave ao processo, analisa as principais causas dos problemas, aplica melhorias ao sistema de forma a melhorar o desempenho e por fim sustenta as melhorias controlando o processo a longo prazo (Sokovic et al., 2010).

Diversos autores defendem que o ciclo DMAIC foi pensado a partir do ciclo PDCA pré-concebido por Shewhart e popularizado por Deming no formato que é conhecido hoje em dia (Franz & Caten, 2003). Na Figura 2.10, adaptada de (Franz & Caten, 2003), é possível ver essa correspondência entre os dois ciclos.

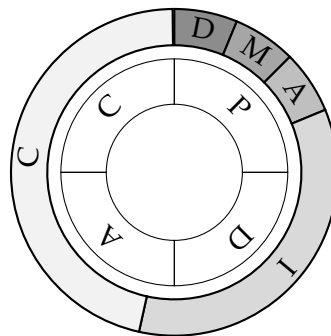


Figura 2.10: Correspondência das etapas do ciclo DMAIC e PDCA

O ciclo DMAIC é sistemático, fornecendo uma estrutura rigorosa, baseada em factos e orientada para os resultados. Apesar da linearidade aparente apresentada na Figura 2.11, os melhores resultados são alcançados quando existe uma estrutura flexível do ciclo indo de encontro às exigências e natureza dos projetos (Sokovic et al., 2010).

Adiante serão abordadas as várias fases do ciclo DMAIC com maior pormenor apresentando-se uma abordagem metodológica a cada etapa com a linha de raciocínio a seguir e quais as ferramentas da qualidade que suportam a cada fase.

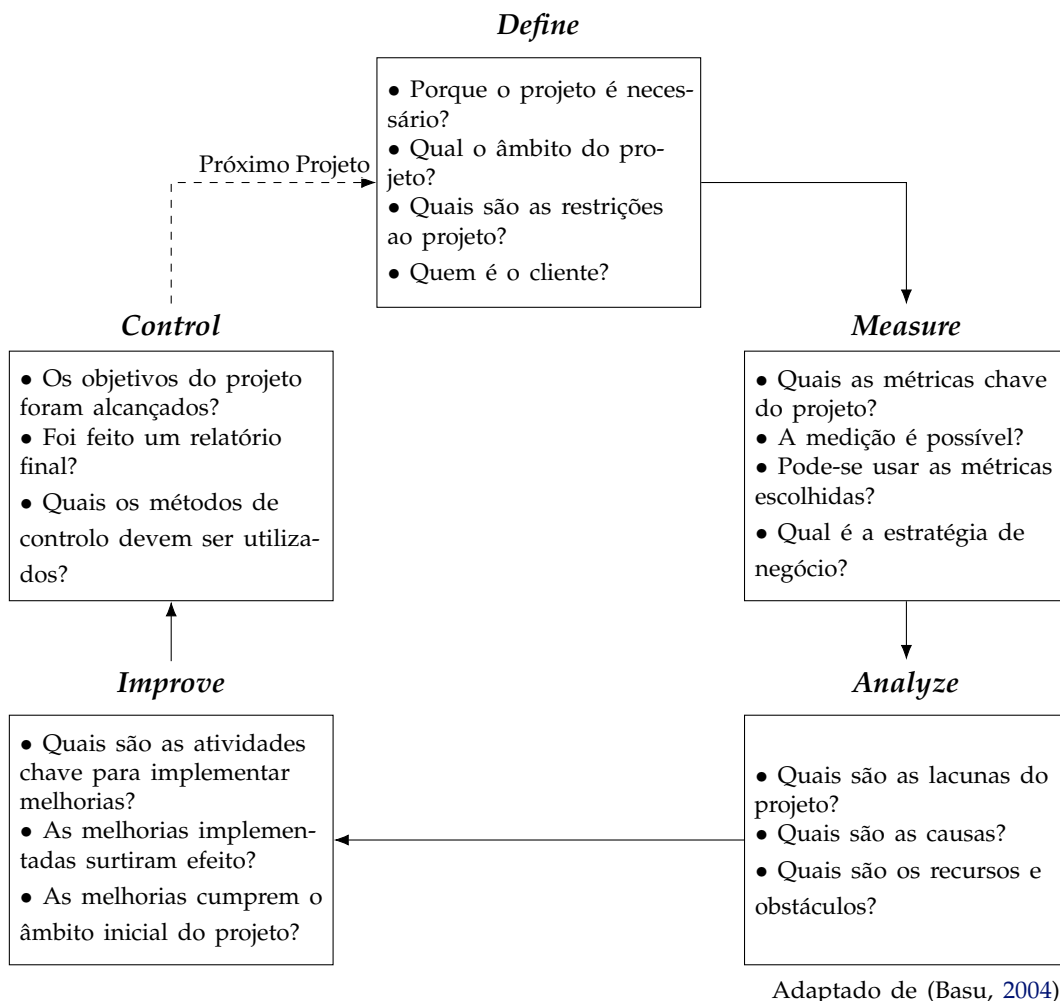
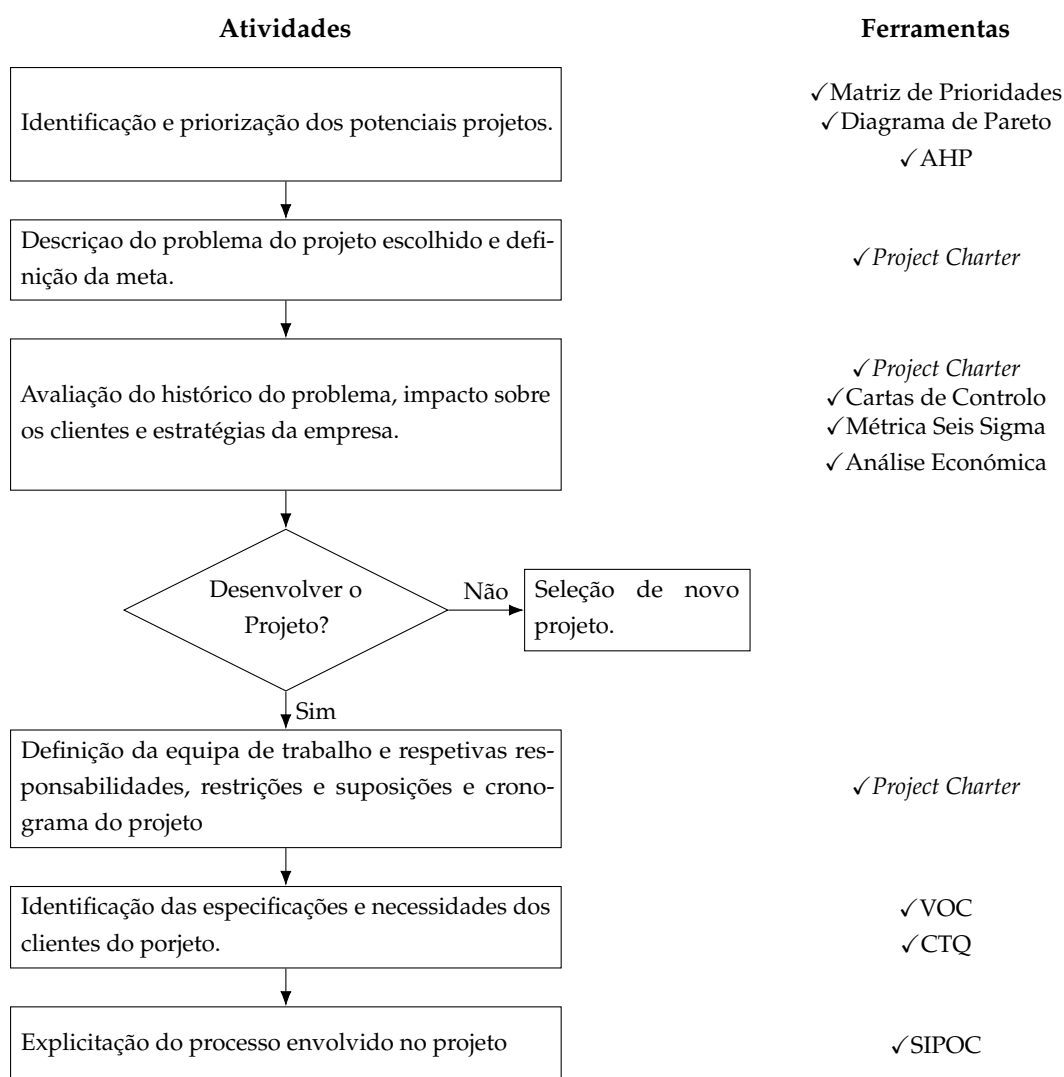


Figura 2.11: Ciclo DMAIC

### 2.2.6.1 Fase *Define*

Sendo a primeira fase do ciclo DMAIC, o *Define* representa muitas vezes o maior desafio para a equipa. Nesta etapa é necessário responder a uma série de questões relacionadas com o âmbito do projeto, o problema prioritário, os objetivos propostos, as restrições e recursos existentes, o papel de cada elemento da equipa e as metas temporais do projeto (Silva, 2013). Por outro lado, é fundamental definir corretamente quem é o cliente e saber quais os seus requisitos e expectativas. Este tem de ser parte integrante ao longo do projeto contribuindo com ideias e dando *feedback* do processo. Inicialmente, alguns autores defendiam um modelo onde não constava a fase *Define*, sugerindo que primeiramente fossem realizados trabalhos de *Benchmarking* e estudos da capacidade do processo. Contudo, após os trabalhos realizados pela General Electric difundiu-se o ciclo DMAIC como hoje é conhecido e aceite "universalmente" (Franz & Caten, 2003).

Na Figura 2.12 é apresentado um mapa de raciocínio, com as atividades da fase *Define* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares para a definição correta do projeto.



Adaptado de (Werkema, 2004)

Figura 2.12: Diagrama de atividades na fase *Define* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares

### 2.2.6.2 Fase *Measure*

O Seis Sigma é um método que é fortemente baseado em métodos estatísticos para entender o comportamento de produtos e processos. Assim, a fase *Measure* é extremamente importante pois é onde se mede a variabilidade do processo com intuito de descobrir as causas do problema. Nesta fase é comum utilizar-se a métrica do Seis Sigma para quantificar o problema e ter base de comparação para as posteriores medições após as melhorias aplicadas. Outra ferramenta importante nesta fase é o Mapa do Processo que permite documentar o conhecimento existente sobre o processo e a partir dele é possível descrever quais as principais atividades, parâmetros do produto durante o processo e em produto final. Por final, podem-se fazer alguns reajustes nas metas definidas na fase *Define* registando uma nova versão do *Project Charter*. Analogamente ao apresentado em 2.2.6.1,



representa-se na Figura 2.13 a linha de raciocínio para a fase *Measure*.

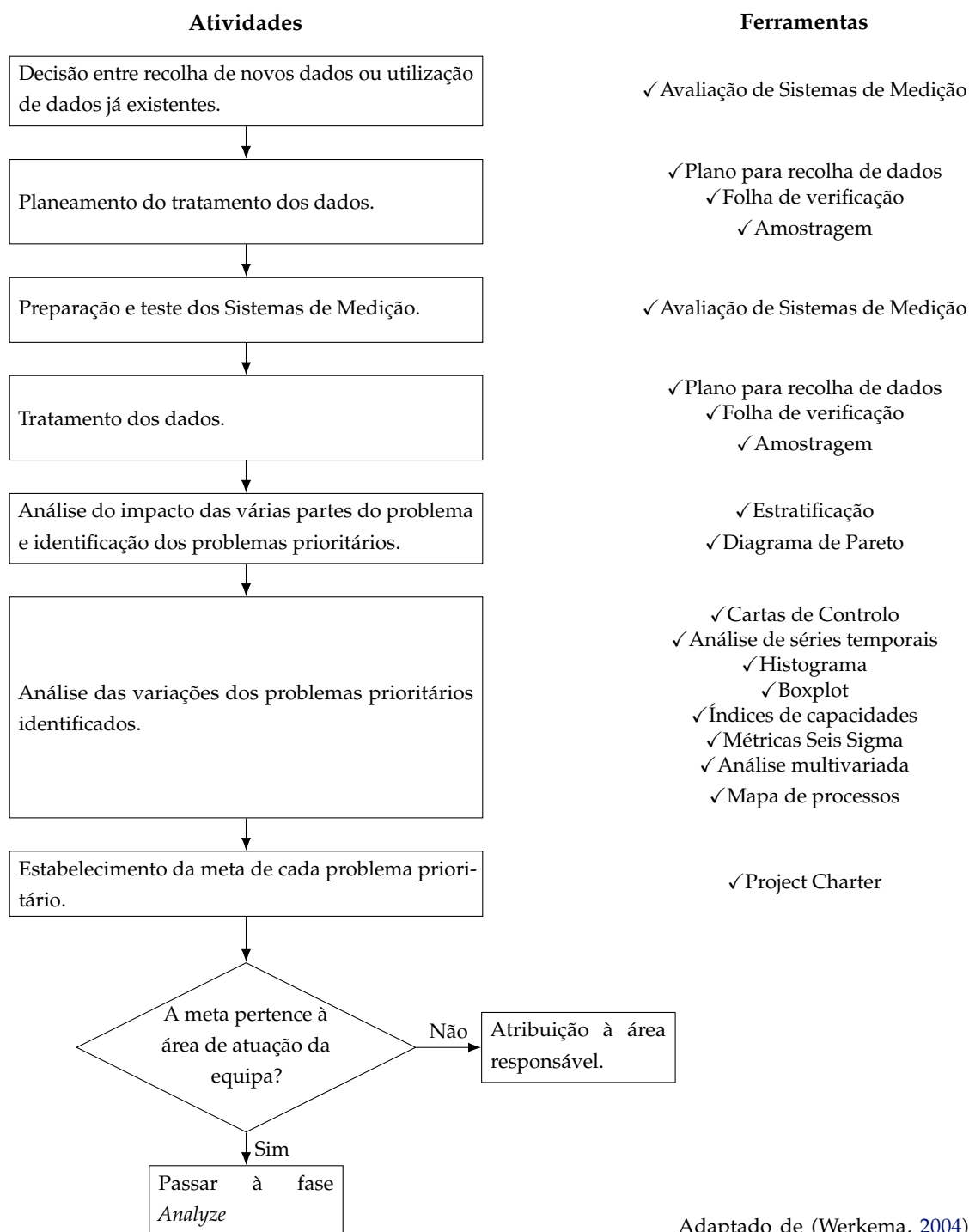


Figura 2.13: Diagrama de atividades na fase *Measure* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares

### 2.2.6.3 Fase *Analyze*

Nesta fase o objetivo é analisar os dados recolhidos de forma a compreender as fontes de variação e identificar as causas potenciais do problema (Montgomery & Woodall, 2008). Nave (2002) defende que a ideia, nesta fase, é converter os dados brutos em informações que permitam a compreensão dos processos, para identificar as causas de defeitos ou problemas, fundamentais ou mais importantes.

Após a identificação das potenciais causas do problema procede-se a uma triagem de quais poderão ser prioritárias de forma a criar uma lista de oportunidades que serão o alvo de ação na próxima fase, o *Improve*. Pande et al. (2000) defendem que se deve rever o Mapa do Processo construído e identificar quais as atividades que acrescentam ou não valor ao processo.

Na Figura 2.14 estão descritas as atividades essenciais na fase *Analyze* e as ferramentas complementares utilizadas em cada atividade.

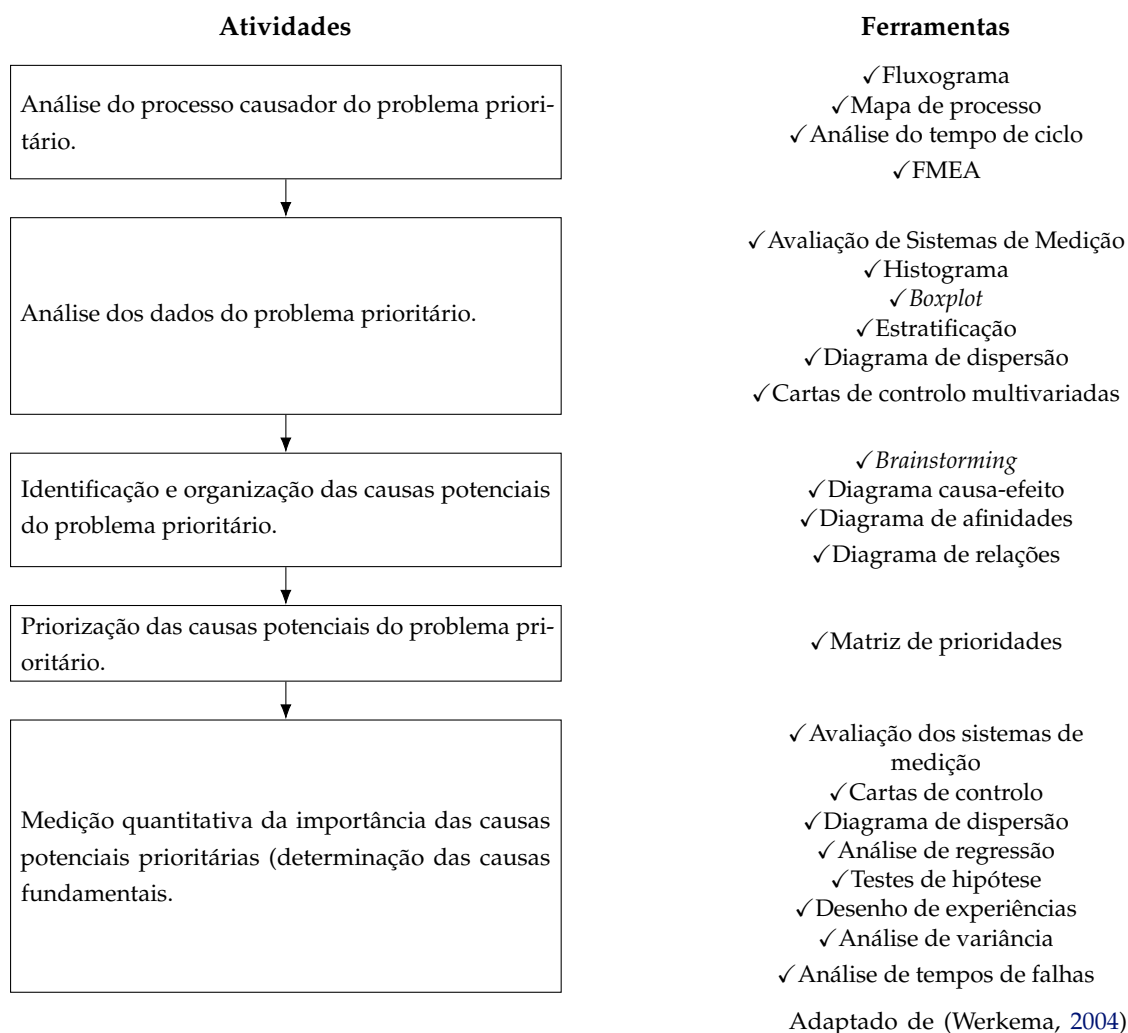


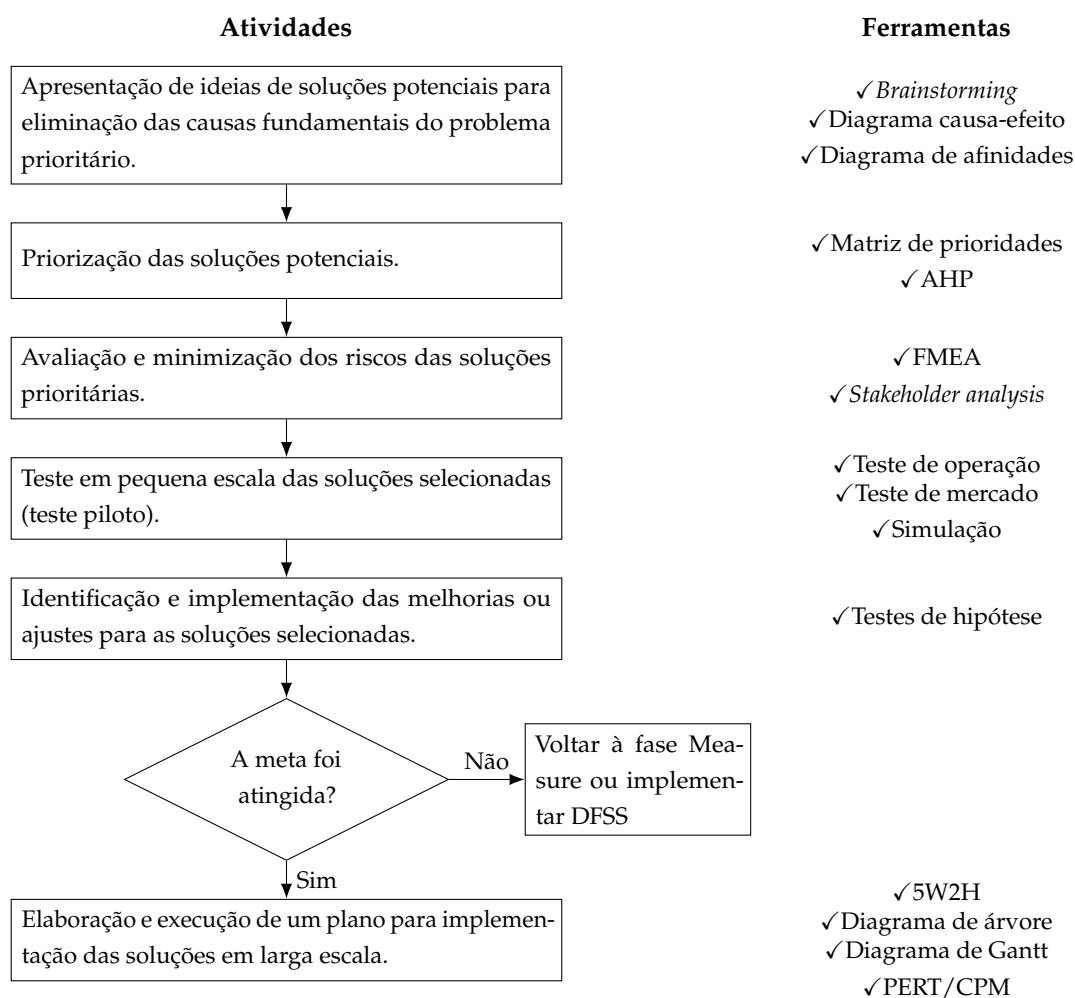
Figura 2.14: Diagrama de atividades na fase *Analyze* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares

### 2.2.6.4 Fase *Improve*

Uma vez identificadas as causas prioritárias do problema que têm influência direta nas fontes de variação do processo, é necessário definir quais as soluções a aplicar ao processo de modo a solucionar o problema.

O objetivo desta fase é encontrar a solução para o problema e executar um teste piloto com intuito de compreender se efetivamente o processo melhorou ou não. Isto pode tornar-se um processo iterativo, sendo a solução escolhida pela equipa redefinida e revista tantas vezes quantas necessárias até atingir a meta proposta na fase *Define* (Montgomery & Woodall, 2008).

São apresentados na Figura 2.15 as atividades principais da fase *Improve* e as ferramentas da qualidade auxiliares utilizadas.



Adaptado de (Werkema, 2004)

Figura 2.15: Diagrama de atividades na fase *Improve* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares

### 2.2.6.5 Fase Control

A fase *Control* é a ultima fase do ciclo DMAIC e tem como objetivo a transferência do projeto para o seu responsável com um plano de controlo definido ou outros procedimentos para assegurar que as melhorias provenientes do projeto sejam institucionalizados (Montgomery & Woodall, 2008). Após um período de maturação do processo, deve ser feita uma reavaliação do mesmo com intuito de verificar se os ganhos obtidos se continuam a verificar a longo prazo. Finalmente, é apresentado na Figura 2.16 as atividades principais desenvolvidas ao longo da fase *Control* e as respetivas ferramentas da qualidade.

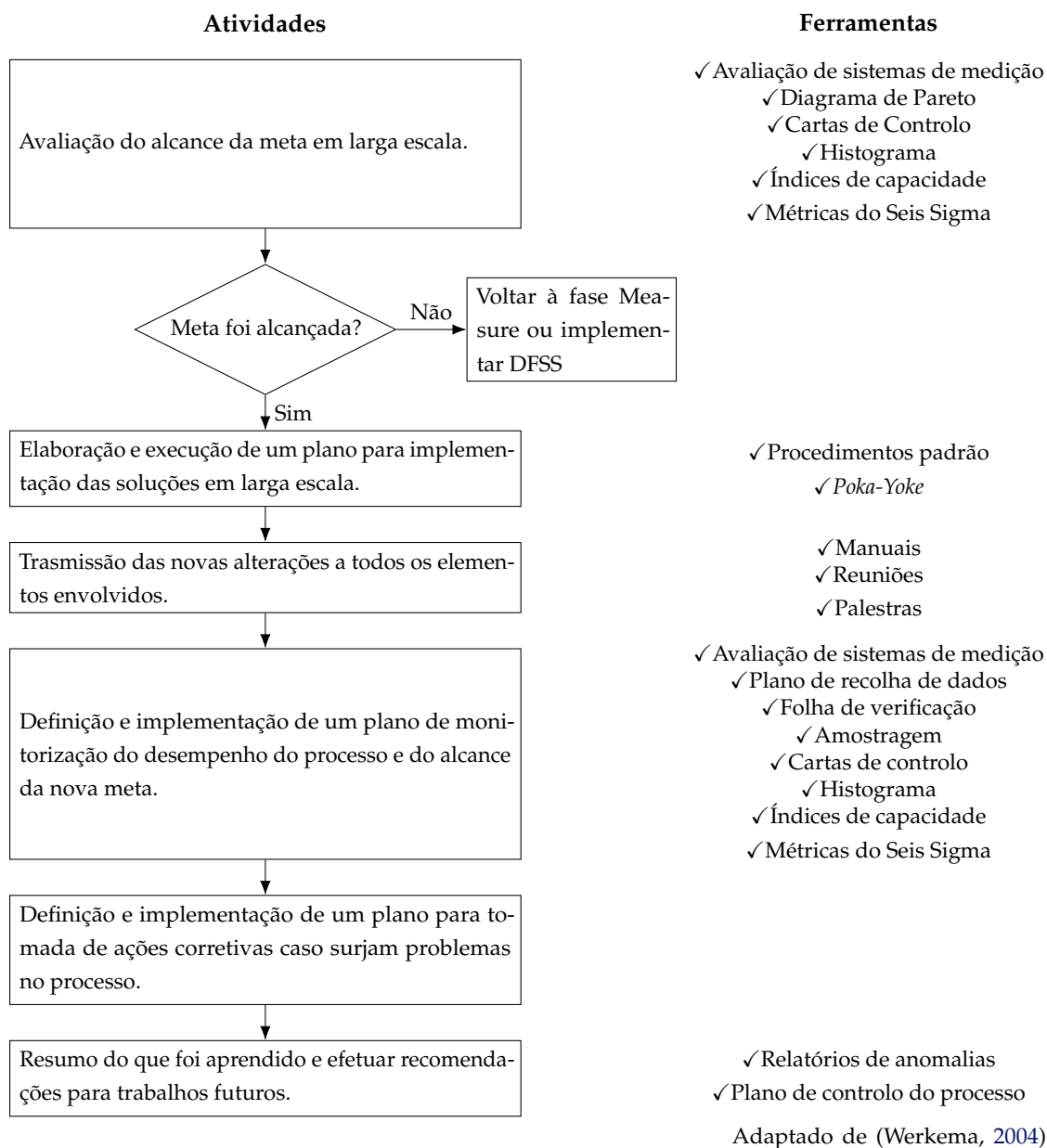


Figura 2.16: Diagrama de atividades na fase *Control* e respetivas ferramentas da qualidade auxiliares

### 2.2.7 Algumas Técnicas e Ferramentas da Qualidade utilizadas no Seis Sigma

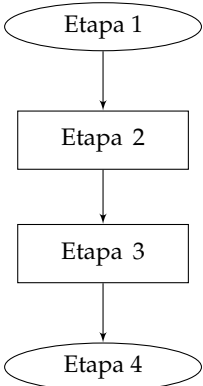
Como referido anteriormente, o ciclo DMAIC utiliza, de forma estruturada, diversas técnicas e ferramentas da qualidade, que auxiliam na tomada de decisão de melhorias a aplicar no processo. De modo a promover a compreensão dos conceitos expostos no Capítulo 4, apresentam-se na seguinte secção algumas das técnicas e ferramentas da qualidade utilizadas no Seis Sigma.

#### 2.2.7.1 Diagrama SIPOC

Diagramas SIPOC são normalmente utilizados ao longo de todo o ciclo DMAIC, com especial importância na fase *Define*. É uma ferramenta de mapeamento poderosa, cujo nome é um acrónimo de *Supplier, Inputs, Process, Output, Customers* (SIPOC) (Marques & Requeijo, 2009).

- Fornecedores (*Suppliers*): entidade que fornece tudo o que é necessário ao processo (informações, dados, matéria-prima). Podem ser internos ou externos à organização;
- Entradas (*Inputs*): informação, dados ou entrada de matéria-prima inicial;
- Processo (*Process*): conjunto de etapas que acrescentam valor às entradas do processo;
- Saídas (*Outputs*): produto, serviço ou informação resultante do processo que vai chegar ao cliente;
- Cliente (*Customer*): entidade a que se destinam as saídas do processo. Podem ser internos ou externos à organização.

Tabela 2.14: Representação de um diagrama SIPOC

<i>Supplier</i> (Fornecedor)	<i>Inputs</i> (Entradas)	<i>Process</i> (Processo)	<i>Output</i> (Saídas)	<i>Customer</i> (Cliente)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecedor 1</li> <li>• Fornecedor 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrada 1</li> <li>• Entrada 2</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Saída 1</li> <li>• Saída 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cliente 1</li> <li>• Cliente 2</li> </ul>

O SIPOC tem como objetivo garantir que a equipa compreende qual o processo em estudo, a relação entre fornecedores e clientes através das respetivas entradas e saídas e

por fim, identificar qual o cliente chave do processo (Lunau et al., 2008). Na Tabela 2.14 pode ser visto um exemplo de um diagrama SIPOC.

### 2.2.7.2 Project Charter

O *Project Charter* (Declaração do projeto) é um documento essencial na fase *Define* do ciclo DMAIC. Formaliza o compromisso entre a equipa Seis Sigma e os gestores da organização.

Deve descrever brevemente e claramente, qual o problema e qual o objetivo do projeto, bem como definir especificamente qual o processo que vai ser alvo de estudo e por fim nomear todos os participantes no projeto e as suas respetivas funções. É elaborado em conjunto entre a gestão da organização e o *Black Belt* responsável pelo projeto (Lunau et al., 2008). Deve conter informais tais como (Werkema, 2004):

- Nome do Projeto;
- Período de execução do projeto;
- Identificação da equipa e os seus respetivos papeis;
- Descrição do problema;
- Definição da meta e objetivos a atingir;
- Dados históricos do problema;
- Restrições e suposições;
- Cronograma preliminar.

### 2.2.7.3 Modelo de decisão TOPSIS

TOPSIS (*technique for order preference by similarity to an ideal solution*) é um modelo de decisão multicritério. O seu princípio básico é escolher a alternativa que se aproxima mais da melhor solução e que por sua vez se afasta mais da pior solução (Opricovic & Tzeng, 2004).

Para tal, o TOPSIS segue os seguintes passos:

1. Elaborar a matriz atributo com as  $i$  alternativas e  $j$  critérios com os respetivos pesos de cada critério ( $w_j$ ). Sendo que  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ;
2. Calcular a matriz de decisão normalizada. Onde o valor normalizado  $r_{ij}$  é calculado por,

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}} \quad j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n. \quad (2.4)$$

Onde  $f_{ij}$  é o resultado da alternativa  $i$  com respeito ao critério  $j$ .

3. Calcular a matriz de decisão normalizada ponderada, onde o valor normalizado ponderado ( $v_{ij}$ ) é dado por,

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad j = 1, \dots, J; i = 1, \dots, n. \quad (2.5)$$

4. Determinar a melhor solução e a pior solução através de,

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \left\{ \left( \max_j v_{ij} \text{ se } i \in I' \right), \left( \min_j v_{ij} \text{ se } i \in I'' \right) \right\} \quad (2.6)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \left\{ \left( \min_j v_{ij} \text{ se } i \in I' \right), \left( \max_j v_{ij} \text{ se } i \in I'' \right) \right\} \quad (2.7)$$

Sendo que,  $I'$  é associado a um critério benéfico e  $I''$  é associado a um critério prejudicial, por exemplo custo.

5. Calcular as distâncias Euclidianas entre as  $i$  alternativas e a solução ideal, sendo que para a melhor solução tem-se,

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+)^2}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2.8)$$

Enquanto para a pior solução tem-se,

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2.9)$$

6. Calcular a proximidade relativa ( $C_j$ ) de cada alternativa para a solução ideal através de,

$$C_j^+ = \frac{D_j^-}{(D_j^+ + D_j^-)}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (2.10)$$

7. Escolher a proximidade relativa ( $C_j$ ) mais próxima de 1.

Sendo um modelo de decisão, o TOPSIS torna-se uma ferramenta muito importante no ciclo DMAIC pois auxilia a equipa de projeto na tomada de decisões entre várias alternativas.

#### 2.2.7.4 Testes de Hipótese

##### 2.2.7.4.1 Comparação de duas variâncias

O teste de hipótese é um método de inferência estatística que permite verificar a partir dos resultados obtidos através de uma, ou mais amostras, se uma determinada hipótese sobre uma ou várias populações deve, ou não, ser rejeitada.

A hipótese que se pretende testar é a Hipótese Nula ( $H_0$ ) a qual se refere sempre a uma igualdade. Por outro lado, a Hipótese Alternativa ( $H_1$ ) contém sempre uma desigualdade na sua formulação e constitui, como o nome indica, uma alternativa à Hipótese Nula (Pereira & Requeijo, 2012).

Assim, caso se queira aferir sobre as variâncias de duas populações formula-se o seguinte teste,

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \quad (2.11a)$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \quad (2.11b)$$

Definida a hipótese a estudar a estatística de teste é dada por

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2.12)$$

em que  $S_1^2$  e  $S_2^2$  são as variâncias amostrais calculadas a partir dos dados recolhidos de ambas as populações ( $n_1$  e  $n_2$ ).

Por fim, a Hipótese Nula é rejeitada se  $F_0 > F_{(1-\alpha/2);(n_1-1)(n_2-1)}$  ou se  $F_0 < F_{\alpha/2;(n_1-1)(n_2-1)}$ . Note-se que, este teste pressupõe que as duas populações são Normais, pelo que se deve verificar primeiro a Normalidade dos dados antes da formulação do teste de hipótese.

#### 2.2.7.4.2 Diferença de duas médias

Caso se queira aferir sobre a diferença de duas médias deve-se formular o seguinte teste de hipóteses:

$$H_0 : \mu_1 - \mu_2 = \Delta_0 \quad (2.13a)$$

$$H_1 : \mu_1 - \mu_2 \neq \Delta_0 \quad (2.13b)$$

$\Delta_0 = 0$  quando se se quiser estudar a "igualdade" das duas médias. Após definido o teste em estudo é necessário escolher a estatística teste adequada ao estudo que depende essencialmente de três premissas: Normalidade dos dados, conhecimento das variâncias das populações ( $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$ ) e se as variâncias das duas populações são significativamente diferentes ou não. Deste modo, é de todo aconselhável estudar primeiro as variâncias das populações como apresentado em 2.2.7.4.1.

Caso as variâncias das populações sejam conhecidas a estatística de teste é dada por

$$Z_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - \Delta_0}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (2.14)$$

sendo a Hipótese Nula rejeitada caso  $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$  (teste bilateral).

Se as variâncias das populações forem desconhecidos, mas não sejam estatisticamente diferentes a estatística de teste é dada por,

$$t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - \Delta_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.15)$$

sendo  $S_p^2$  a variância combinada das duas populações dada por,

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.16)$$



A Hipótese Nula é rejeitada se  $|t_0| > t_{\alpha/2; (n_1+n_2-2)}$ .

Por fim, se as variâncias das populações forem desconhecidas, mas forem significativamente diferentes a estatística de teste é definida por,

$$t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - \Delta_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.17)$$

sendo a Hipótese Nula rejeitada se  $|t_0| > t_{\alpha/2; \nu}$  com

$$\nu = \frac{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1-1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2-1}} \quad (2.18)$$

#### 2.2.7.4.3 Comparação de duas proporções de defeituosos

Em contexto industrial muitas vezes é necessário distinguir o modo de funcionamento entre duas máquinas ou dois processos distintos. Neste sentido, aferir estatisticamente sobre a proporção de defeituosos ( $p$ ) dos dois equipamentos torna-se um meio expedito no auxílio da tomada de decisão.

Contudo, a proporção de defeituosos é um acontecimento discreto (passa ou não passa), associado a uma distribuição Binomial. Montgomery (2009) apresenta um teste que permite perceber se duas populações produzem a mesma proporção de defeituosos através da aproximação da distribuição Binomial a uma distribuição Normal. Para tal, recolhem-se duas amostras ( $n$ ) de cada população, tendo em atenção que  $np > 5$  e  $n(1-p) > 5$  para que a aproximação à distribuição Normal seja consistente (Pereira & Requeijo, 2012).

Assim, define-se as seguintes hipóteses:

$$H_0 : p_1 = p_2 \quad (2.19a)$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2 \quad (2.19b)$$

Sendo a estatística de teste dada por,

$$Z_0 = \frac{\hat{p}_1 - \hat{p}_2}{\sqrt{\hat{p}(1-\hat{p})(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}} \quad (2.20)$$

que se aproxima da distribuição Normal reduzida  $N(0,1)$  e  $\hat{p}$  é uma proporção combinada dada por,

$$\hat{p} = \frac{x_1 + x_2}{n_1 + n_2} \quad (2.21)$$

Assim, se  $Z_0 \notin [-Z_{\alpha/2}; Z_{\alpha/2}]$  rejeita-se a hipótese nula, pelo que existem evidências estatísticas que as proporções de defeituosos das duas populações são diferentes.

### 2.2.7.5 Capacidade de sistemas de medição

Como referido anteriormente um processo é influenciado por fontes de variação externas, sendo uma delas o sistema de medição. Para que o controlo da qualidade seja eficaz o equipamento deve possuir três características chave: exatidão, linearidade e estabilidade. Isto é, um equipamento deve ter a aptidão de ler valores próximos do valor real, e esses valores devem ter uma relação linear com os valores medidos num equipamento padrão. Por fim, um equipamento deve apresentar uma variabilidade reduzida numa leitura feita ao longo do tempo.

Neste sentido, os estudos da repetibilidade têm vindo a auxiliar na aferição da capacidade de um determinado sistema de medição. Entende-se por repetibilidade a capacidade do equipamento fornecer, sob as mesmas condições, valores de medição análogos quando uma determinada característica da qualidade é medida repetidamente na mesma unidade de produto. Por outro lado, quando a medição necessita de um operador para a executar, a repetibilidade também permite perceber a capacidade do operador fazer (ou não) a mesma leitura ao longo do tempo (Pereira & Requeijo, 2012).

Note-se que, na análise da capacidade de sistemas de medição é comum analisar-se também a reprodutibilidade, que mede a capacidade de um equipamento fazer a mesma medição sendo utilizado por  $n$  operadores distintos. Contudo, como se verá adiante, na presente dissertação não foi estudada a reprodutibilidade, pelo que não se abordará a sua componente teórica.

#### 2.2.7.5.1 Estudo da Repetibilidade

Um dos métodos utilizados no estudo da repetibilidade envolve a construção de cartas  $\bar{X}$  e  $R$ . Estas duas cartas permitem controlar tanto a média ( $\bar{X}$ ) como a amplitude ( $R$ ) de uma determinada característica da qualidade. Para a sua construção deve-se recolher  $m$  amostras de dimensão  $n$  ao longo do tempo até perfazer 100 observações individuais ( $N = n \times m$ ), sendo que os respetivos limites de controlo se encontram na Tabela 2.15.

Tabela 2.15: Limites de controlo das cartas  $\bar{X}$  e  $R$

Carta	LIC	LC	LSC
$\bar{X}$	$\bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$
$R$	$D_3 \bar{R}$	$\bar{R}$	$D_4 \bar{R}$

Onde,  $A_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  são constantes que dependem apenas da dimensão da amostra ( $n$ ) e podem ser consultadas na Tabela A.3, apresentada no Anexo A, enquanto  $\bar{\bar{X}}$  e  $\bar{R}$  são calculados segundo as Equações 2.22 e 2.23, respetivamente.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (2.22)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.23)$$

No entanto, ao contrário da carta de controlo  $\bar{X}$  em que se pretende que os valores se encontrem dentro dos limites de controlo, no estudo de repetibilidade o pretendido é o oposto. Isto é, pretende-se detetar o maior número possível de pontos fora dos limites de controlo, pois, tal facto indica que o equipamento de medição tem boa capacidade de distinguir entre as várias unidades do produto. Por outro lado, na carta  $R$  pretende-se que todos os valores estejam sob controlo estatístico, o que significa que o equipamento tem capacidade de efetuar a mesma leitura repetidas vezes.

Pereira e Requeijo (2012) sugerem a seguinte metodologia para o estudo da repetibilidade:

1. Recolha aleatória de  $m$  unidades do produto;
2. Numeração das  $m$  unidades;
3. Medição da característica em estudo, em cada uma das  $m$  unidades;
4. Repetir o passo 3 até perfazer o número de medições desejado para cada unidade ( $r$ );
5. Construção das cartas  $\bar{X}$  e  $R$ ;
6. Estimação do desvio padrão da repetibilidade.

$$\hat{\sigma}_{Repet.} = \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (2.24)$$

Onde  $\bar{R}$  é a média de todas as amplitudes e o valor de  $d_2^*$  depende do número de medições por cada unidade ( $r$ ) e de  $g = n^\circ \text{ de unidades} \times n^\circ \text{ de operadores}$ . Sendo que, quando  $g > 15$  então  $d_2^* = d_2$ .

7. Cálculo da repetibilidade

$$Repetibilidade = 6 \times \hat{\sigma}_{Repet.} \quad (2.25)$$

Como foi referido pretende-se que a carta de controlo  $\bar{X}$  apresente mais de 30% dos pontos fora de controlo, enquanto na carta  $R$  espera-se que nenhum ponto esteja fora de controlo.

#### 2.2.7.6 Mapa de Processos

Ao contrário de um diagrama normal, que apenas descreve quais as atividades do processo, o Mapa de Processos apresenta quem são as entidades responsáveis por essas atividades. Assim, cada entidade envolvida no processo tem uma linha (*swim lane*) correspondente, onde estão representadas as atividades desenvolvidas por essa entidade. Deste modo,

é possível ter uma representação do processo mais clara e por outro lado permite saber quem é responsável por que atividades.

De notar que, as linhas podem representar também localizações ou entidades externas ao processo em estudo. Do mesmo modo, é também possível representar informações adicionais no diagrama tais como: tempo despendido, custos associados, valor adicionado ou o grau de conclusão do processo global (Andersen, 2007).

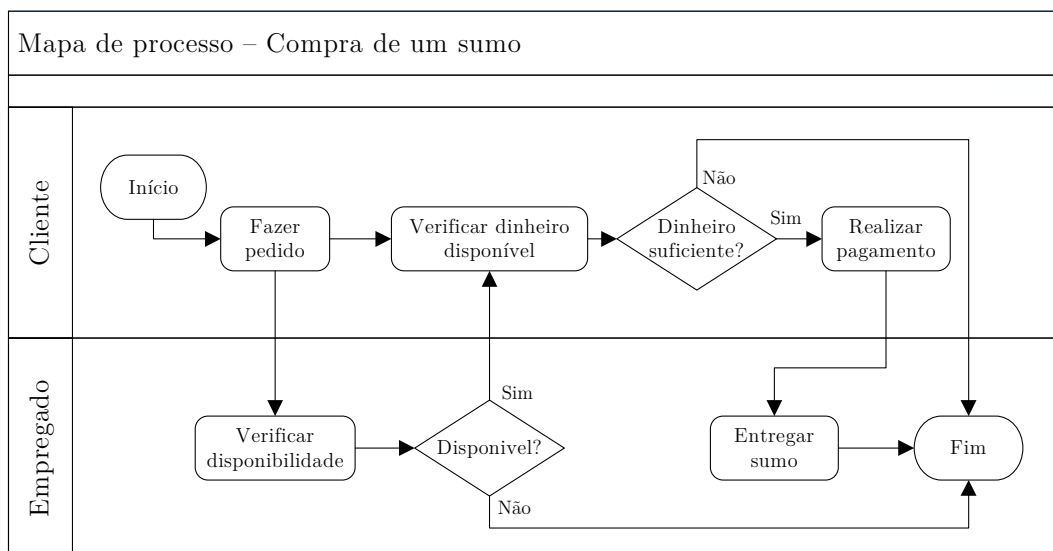


Figura 2.17: Exemplo de um mapa de processo sobre a compra de um sumo

### 2.2.7.7 Diagrama de Causa-Efeito

Desenvolvido por Kaoru Ishikawa, em 1943, o diagrama de Causa-Efeito tem por objetivo relacionar as causas do problema com os efeitos que as mesmas produzem. A equipa de trabalho procura identificar o máximo de causas potenciais do problema que posteriormente são agrupadas em categorias principais. Estas categorias variam consoante o contexto em que a ferramenta vai ser aplicada. Isto é, em áreas administrativas é comum dividir-se em: políticas, posição, procedimentos e recursos humanos, enquanto que em contexto industrial pode-se dividir as causas principais em seis categorias: Meio Ambiente, Medições, Métodos, Materiais Equipamentos e Mão de Obra (Pereira & Requeijo, 2012)(Rothwell et al., 2012).

Para a sua construção começa-se por escolher o problema (efeito) prioritário e escreve-lo no retângulo mais à direita do diagrama, como mostrado na Figura 2.18. Após definido o problema e escolhidas as categorias principais, a equipa de trabalho procura identificar o máximo de causas possíveis (reais ou potenciais). Nesta fase o *Brainstorming* torna-se uma ferramenta bastante eficaz. Cada causa é afetada a uma categoria principal que pode ser subdividida quantas vezes necessário, sendo comum a divisão não ter mais do que três ou quatro níveis (Pereira & Requeijo, 2012).

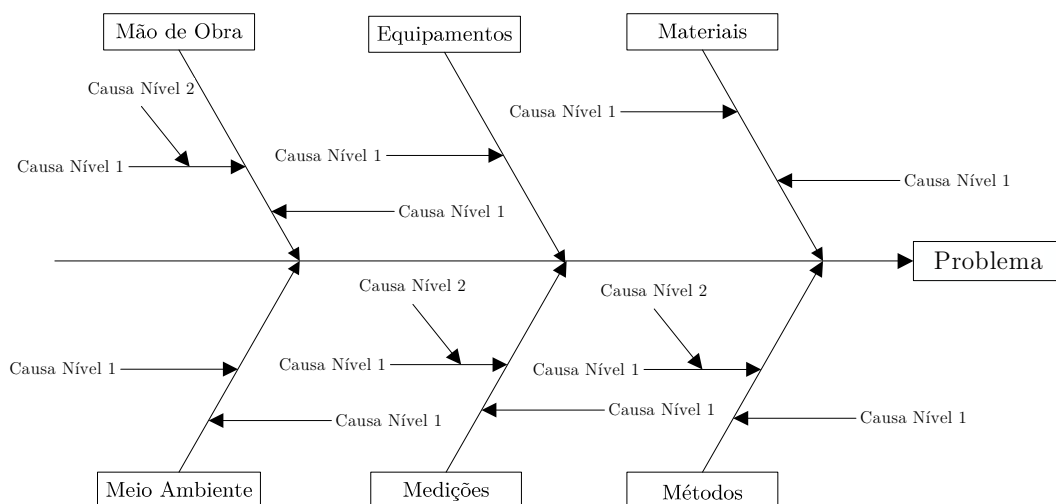


Figura 2.18: Exemplo de um diagrama Causa-Efeito

### 2.2.7.8 Desenho de Experiências - um fator a vários níveis

Ao contrário do que foi apresentado em 2.2.7.4.2, onde se pretendia comparar a média de duas populações, imagine-se que se pretende comparar a média de três ou mais populações. Neste caso, a técnica estatística que permite essa comparação é a análise de variância, também conhecida por ANOVA do inglês *analysis of variance* (Pereira & Requeijo, 2012).

Na terminologia do desenho de experiências os *fatores* dividem-se em *controláveis* e *não controláveis*. Entende-se por *fator controláveis* é uma variável cujos valores são alterados pelos investigadores assumindo vários *níveis* ao longo do estudo. Esta variação dos *níveis* do *fator* produz um determinado *efeito* na característica em estudo  $Y$ , também designada por *resposta*. Considere-se apenas o modelo de *efeitos fixos* onde os níveis são escolhidos pelos investigadores e não são uma amostra aleatória de um universo possível de níveis.

Tabela 2.16: Desenho com um fator a vários níveis

Nível	Valor das réplicas	Soma	Média
$i = 1, 2, \dots, a$	$j = 1, 2, \dots, n$	$Y_{i.}$	$\bar{Y}_{i.}$
1	$y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n}$	$Y_{1.}$	$\bar{Y}_{1.}$
2	$y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n}$	$Y_{2.}$	$\bar{Y}_{2.}$
3	$y_{31}, y_{32}, \dots, y_{3n}$	$Y_{3.}$	$\bar{Y}_{3.}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$a$	$y_{a1}, y_{a2}, \dots, y_{an}$	$Y_{a.}$	$\bar{Y}_{a.}$

Repare-se que as observações  $y_{ij}$  (valor medido no nível  $i$  e réplica  $j$ ) é dado pela Equação 2.26,

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (2.26)$$

onde,

$Y_{ij}$  observações independentes e Normalmente distribuídas com média  $\mu_i = \mu + \tau_i$  e variância homogênea  $\sigma^2$

$\mu_i$  valor esperado do grupo de observações correspondentes ao nível  $i$

$\mu$  média global, que é um parâmetro comum a todos os níveis

$\tau_i$  parâmetro correspondente ao efeito do nível  $i$

$\varepsilon_{ij}$  variável aleatória Normalmente distribuída com valor esperado nulo e variância constante

Formula-se, então, o seguinte teste de hipótese para testar se há diferenças significativas entre os valores médios referentes aos diversos níveis,

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad (2.27a)$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_k \quad \text{para, pelo menos, um } \text{par}(i, k) \quad (2.27b)$$

Para testar a afirmação anterior recorre-se à Análise de Variância, construindo a tabela ANOVA como sintetizado na Tabela 2.17. Entende-se por  $SS_T$  a variação total (*Total Sum of Squares*), que é calculado segundo a Equação 2.28. Do mesmo modo,  $SS_B$  (*Between Sum of Squares*), representa a variação entre os níveis ou tratamentos (Equação 2.31), enquanto  $SS_W$  (*Within Sum of Squares*) é a variação dentro dos níveis ou tratamentos (Equação 2.33). Por sua vez,  $g.l$  representa o número de graus de liberdade respectivos, sendo  $N = a \times n$ , e  $MS$  são os desvios quadráticos médios, do inglês *Mean Square*.

Tabela 2.17: Tabela ANOVA para um fator a vários níveis

Fonte de Variação	$SS$	$g.l$	$MS$	$F_0$
Entre Tratamentos	$SS_B$	$a - 1$	$SS_B / (a - 1)$	$MS_B / MS_W$
Erro (interior)	$SS_W$	$N - a$	$SS_W / (N - a)$	
Total	$SS_T$	$N - 1$		

Onde,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N} \quad (2.28)$$

com,

$$Y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.29)$$

sendo,

$$\frac{(Y_{..})^2}{N} = \frac{(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij})^2}{N} = \text{Fator de Correção} \quad (2.30)$$

e,

$$SS_B = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i.}^2}{n} - \frac{(Y_{..})^2}{N} \quad (2.31)$$

com,

$$Y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.32)$$

vindo, por último,

$$SS_W = SS_{erro} = SS_T - SS_B \quad (2.33)$$

Finalmente, o valor da estatística de teste é comparado com o valor crítico ( $F_{critico}$ ), dado por  $F_{\alpha;(a-1);(N-a)}$ , que é consultado nas tabelas da distribuição de Fisher. Valores superiores ao  $F_{critico}$  significam que  $MS_B > MS_W$  pelo que se rejeita a Hipótese Nula. Note-se que apenas interessa estudar se  $MS_B > MS_W$  o que faz com que este teste seja unilateral à direita apenas (Pereira & Requeijo, 2012). Pois, o valor esperados de  $MS_B$  e  $MS_W$  são dados por

$$E(MS_B) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (2.34)$$

$$E(MS_W) = \sigma^2 \quad (2.35)$$

Então, se os níveis forem significativamente diferentes, o efeito do parâmetro para o nível  $i$  é diferente de zero ( $\tau_i \neq 0$ ) logo  $MS_B$  será sempre maior que  $MS_W$ .

#### 2.2.7.8.1 Verificação dos pressupostos da análise de variância

Para que, o exposto em 2.2.7.8 seja verdade, é necessário que sejam verificados os pressupostos da análise de variância, isto é, se os erros são independentes, Normalmente distribuídos com média nula e variância constate. Para tal, efetua-se a análise de resíduos, que se obtém pela diferença entre os valores observados e os correspondentes valores previstos.

Neste caso, os valores previstos ( $\hat{y}_{ij}$ ) são dados pela média das observações do nível correspondente ( $\bar{Y}_{i.}$ ).

$$\hat{y}_{ij} = \hat{\mu}_i = \bar{Y}_{i.} \quad (2.36)$$

Enquanto, os valores dos resíduos corresponde à diferença entre os valores observados e os valores previstos, definido por,

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} = y_{ij} - \bar{Y}_{i.} \quad (2.37)$$

Por fim, a análise de resíduos deve cumprir os seguintes pressupostos:

1. Normalidade: Teste de Kolmogorov-Smirnov, ou construção do gráfico das probabilidades da distribuição Normal;
2. Independência: Gráfico *Resíduos vs Ordem da execução das experiências*;

3. Homogeneidade da variância: Teste de Bartlett, ou gráfico dos resíduos em função dos valores esperados.

Sendo que, caso os pressupostos da Normalidade e da Homogeneidade da variância não se verifiquem deve proceder-se à transformação dos dados originais (Pereira & Requeijo, 2012).

#### 2.2.7.8.2 Teste da menor diferença significativa

A análise de variância apresentada em 2.2.7.8 permite concluir se existe diferença entre os diversos níveis dos fatores. No entanto, não possibilita saber quais os níveis que se diferenciam entre si, por conseguinte, um dos testes que permite fazer uma comparação entre os vários pares de médias é o teste *LSD* (*Least Significant Difference*) (Pereira & Requeijo, 2012).

Para um teste bilateral, em que o número de observações para os diversos níveis é igual a  $n$ , o valor do *LSD* é dado por,

$$LSD = t_{\alpha/2; (N-a)} \sqrt{\frac{2MS_{erro}}{n}} \quad (2.38)$$

Sendo que as médias de dois níveis são significativamente diferentes quando,

$$|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > LSD \quad (2.39)$$

Onde,  $\bar{Y}_i$  e  $\bar{Y}_j$  são as médias das observações para o nível  $i$  e  $j$ , respetivamente.

#### 2.2.7.9 Métodos de Taguchi

Taguchi introduziu o conceito de "perda económica" na definição de qualidade. Para minimizar essa perda, Taguchi considera que um produto deva ser *robusto* a todo e qualquer ruído que afete o desempenho do processo. Para minimizar esse ruído, Taguchi propõe que se estude quais os melhores valores dos níveis dos fatores controláveis, maximizando o desempenho e a qualidade dos produtos e processos, com finalidade de se reduzir a variabilidade. Contudo, quando a redução da variabilidade pelo estudo dos fatores é insuficiente devem ser concebidos compromissos entre a redução de variabilidade e o custo daí resultante (Pereira & Requeijo, 2012).

Este método de Taguchi enquadra-se no controlo de qualidade *off-line*, pela sua utilização ser exterior à linha de produção, centrando-se na fase de conceção do produto, ou seja, antes do fabrico, propriamente dito (Castro, 2001).

Taguchi definiu matrizes ortogonais para o planeamento das experiências, denominadas por  $L_N$ , onde  $N$  denomina o número de experiências a realizar. Estas matrizes permitem estudar fatores a 2, 3 ou 4 níveis, assim como interações entre fatores.

A escolha da matriz deve ser feita em função do número de fatores, níveis e/ou interações que os investigadores pretendam estudar. Cada matriz comporta  $(N - 1)$  graus de liberdade, sendo que cada fator e interação a 2 níveis representa 1 g.l, enquanto 1 fator a 3 níveis representa 2 g.l, por exemplo.



### 2.2.7.9.1 Matriz $L_9$ para estudar fatores a três níveis

Taguchi definiu matrizes que permitem estudar fatores a três níveis, sendo uma dessas matrizes a  $L_9$  (Tabela 2.18). Existe ainda a possibilidade de estudar fatores a três níveis numa  $L_{27}$ , aumentando assim o número de experiências, ou por outro lado, utilizando uma das matrizes que prevê mistura de níveis, como é o caso da  $L_{18}$  que permite misturar fatores com dois e três níveis.

Tabela 2.18: Matriz  $L_9$  para estudar fatores a três níveis

Exp <sup>a</sup> .	Fator ou Interação			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Como referido anteriormente, a matriz  $L_9$  comporta 8 graus de liberdade ( $9 - 1$ ), pelo que admite até um máximo de quatro fatores, uma vez que um fator com três níveis possui 2 graus de liberdade. Do mesmo modo, é também possível estudar dois fatores e a sua interação, sendo os fatores afetados às colunas 1 e 2 enquanto a coluna 3 e 4 servem para estudar a sua interação (4g.l). Nem sempre se procede à afetação do número máximo de fatores que a matriz pode comportar, o que faz com que a matriz não esteja saturada, contudo as colunas desocupadas podem ser utilizadas como uma primeira estimativa de aproximação ao erro (Pereira & Requeijo, 2012).

Existem duas formas de fazer o tratamento dos dados nos métodos de Taguchi, pela resposta média, ou pelo índice sinal-ruído (Melo, 2014). O tratamento pela resposta média recorre ao modelo matemático utilizado no DOE clássico onde,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (2.40)$$

com,

$$Y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (2.41)$$

sendo que,  $y_{ijk}$  é o valor da observação  $k$  do nível  $i$  na réplica  $j$ .

Por sua vez, os valores dos SS dos fatores, é dado por,

$$SS_X = \frac{\sum_{i=1}^a (\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk})^2}{bn} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (2.42)$$

Note-se que, no caso de uma matriz  $L_9$ ,  $a$  e  $n$  tomam valores entre 1 e 3, visto estudarem-se fatores a três níveis que são observados três vezes cada um. Posteriormente procede-se à análise da variância como apresentado em 2.2.7.8 tendo em conta que cada fator tem 2 g.l e o número total de graus de liberdade é igual a  $(abn - 1)$ .

No caso do tratamento pelo índice sinal-ruído ( $S/N$ ), Taguchi propõe que se transforme os valores observados numa nova medida de desempenho que se pretende maximizar. Dependendo da característica da qualidade em estudo, Taguchi definiu uma série de índices sinal-ruído:

- Nominal-é-melhor

$$(S/N)_i = 10 \log \left( \frac{\bar{Y}_i^2}{\bar{S}_i^2} - \frac{1}{n} \right) dB \quad (2.43)$$

onde,  $n$  é o número de observações para cada experiência,  $\bar{Y}_i$  a média amostral para a experiência  $i$  e  $\bar{S}_i^2$  a variância amostral para a experiência  $i$ . Para efeitos práticos, quando o valor de  $n$  for relativamente elevado, a Equação 2.43 é equivalente a,

$$(S/N)_i = 20 \log \left( \frac{\bar{Y}_i}{\bar{S}_i} \right) dB \quad (2.44)$$

- Menor-é-melhor

$$(S/N)_i = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right) dB \quad (2.45)$$

- Maior-é-melhor

$$(S/N)_i = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right) dB \quad (2.46)$$

Repara-se que, neste caso o número de observações passam a ser iguais ao índice da matriz, isto é, numa  $L_9$   $n$  toma o valor de nove. De resto, procede-se ao tratamento dos dados como apresentado anteriormente, no tratamento pela resposta média.

Apesar de nos métodos de Taguchi não se realizar a verificação dos pressupostos da análise de variância, Taguchi propõe que se realize uma experiência de confirmação com os melhores níveis para os fatores em estudo. Caso o valor da resposta se encontre dentro de um intervalo de confiança obtido, considera-se assim, que o planeamento foi bem conseguido e as conclusões tiradas estão, em grande parte, corretas. Por ultimo, Taguchi introduziu também um novo conceito em que se calcula a percentagem de contribuição de cada fator para a variação total (Pereira & Requeijo, 2012).

#### 2.2.7.10 Carta Laney $p'$

Como referido em 2.2.7.4.3 controlar a proporção de defeituosos torna-se num método expedito e intuitivo de aferir sobre o funcionamento de um determinado processo. Nesse sentido, surgem na literatura diversas Cartas de Controlo de Atributos, que permitem controlar desde a proporção de defeituosos (carta  $p$ ) até controlar o número de defeitos por unidade (carta  $u$ ).

Em 1990 David Laney dava formação na BellSouth sobre como usar cartas de controlo. Numa dessas formações, surgiu o projeto de analisar as chamadas de emergências da linha 911, na Florida, por mês. Contudo, quando dispôs os dados numa carta  $p$  reparou que algo não estava certo, pois os limites encontravam-se demasiado próximos, fazendo com que os pontos estivessem todos fora de controlo. Laney, deu o nome de sobredispersão (*overdispersion*) a este fenómeno. Quando as amostras ( $n$ ) são demasiados grandes, a dispersão amostral é praticamente zero (Fox & Martz, 2016). Ora atente-se na formula de cálculo dos limites de controlo da carta  $p$  com limites variáveis,

$$LSC_p = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}} \quad (2.47a)$$

$$LC_p = \bar{p} \quad (2.47b)$$

$$LIC_p = \max\left(0; \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}\right) \quad (2.47c)$$

Como se verifica, a dispersão é calculada por  $\left(\sigma_{p_i} = \sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}\right)$ , pelo que, quanto maior for  $n$  menor vai ser a dispersão e consequentemente mais apertado será o limite de controlo. Este facto explica-se, essencialmente, porque a carta  $p$  prevê que os parâmetros da distribuição se mantêm constantes ao longo do tempo, o que nem sempre se verifica em contexto industrial (Laney, 2002). O mesmo se passa no caso da carta  $Z_p$ , observe-se a formula de calculo da variável  $Z_p$  apresentada na Equação 2.48. Quanto maior for a dimensão da amostra ( $n$ ) menor será o denominador pelo que, por menor que seja a diferença entre  $p_i$  e  $\bar{p}$ ,  $Z_p$  irá tomar sempre valores demasiado elevados, que estarão certamente fora dos limites  $-3$  e  $3$ .

$$(Z_p)_i = \frac{p_i - \bar{p}}{\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n_i}}} \quad (2.48)$$

Uma das formas de contornar este problema é ignorar que a variável em estudo é um atributo (conforme ou não conforme) e simplesmente dispor os dados numa carta de observações individuais e amplitudes móveis (carta  $X$ ). No entanto, na carta  $X$  os limites são fixos, calculados por,

$$LSC_X = \bar{X} + 3\frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.49a)$$

$$LIC_X = \bar{X} - 3\frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.49b)$$

Assim, não é considerada a variação entre as  $m$  dimensões da amostra em estudo. Este facto pode conduzir a erros na interpretação das cartas, ora repare-se, sendo o limite calculado com base numa média  $\overline{MR}$ , pode perder-se a sensibilidade de detetar grandes

alterações na média, pois o valor do limite calculado nesse instante é amortecido pelas restantes  $m$  amostras.

Laney sugere que se faça uma combinação entre os conceitos da carta  $Z_p$  com a carta  $X$ . Isto é, transformar o valor dos atributos numa variável  $z$  e dispô-los numa carta  $X$ . Primeiramente, transformam-se os dados numa variável  $Z$  como apresentado na Equação 2.48. Em seguida, calcula-se uma amplitude móvel  $R'$  entre os valores da variável  $Z$ ,

$$R'_i = |Z_i - Z_{i-1}| \quad (i = 2, \dots, k) \quad (2.50)$$

Calcula-se a média dessa amplitude móvel por,

$$\bar{R}' = \frac{1}{k-1} \sum_{i=2}^k R'_i \quad (2.51)$$

Sendo, o desvio padrão dado por,

$$\sigma_z = \bar{R}' / d_2 \quad (2.52)$$

Com  $d_2 = 1.128$ , uma vez que para amplitudes móveis  $n = 2$ . Desta forma, deixa de se assumir que o desvio padrão entre os valores de  $Z$  é zero e passa a tomar o seu valor real.

Posto isto, volta-se a transformar a variável  $Z$  numa variável  $p$  através de,

$$p_i = \bar{p} + \sigma_{p_i} Z_i \quad (2.53)$$

Sendo os limites de controlo calculados da seguinte forma,

$$LSC_p = \bar{p} + 3\sigma_{p_i}\sigma_Z \quad (2.54a)$$

$$LC_p = \bar{p} \quad (2.54b)$$

$$LIC_p = \bar{p} - 3\sigma_{p_i}\sigma_Z \quad (2.54c)$$

Assim, aconselha-se a seguinte metodologia, apresentada na Figura 2.19, para a escolha da carta de controlo de proporção de defeituosos.

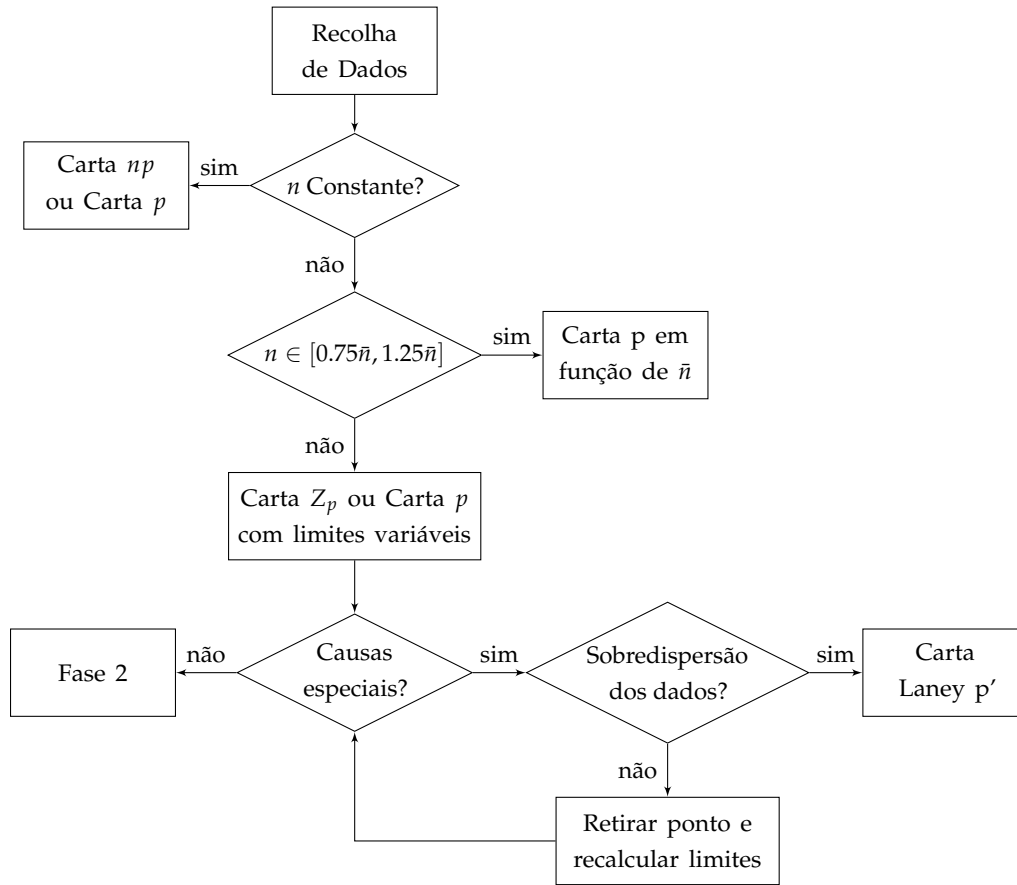


Figura 2.19: Diagrama escolha da carta de proporção de defeituosos

### 2.2.7.11 Teste de Bartlett

Como referido anteriormente, um dos pressupostos da análise de resíduos para o tratamento de um DOE clássico é a homogeneidade da variância. Neste sentido, surge o Teste de Bartlett que tem por objetivo comparar as variâncias de mais de duas populações e testando se existem evidências de haver diferenças significativas ou não entre elas. No entanto, este teste apenas é aplicado quando a dimensão da amostra  $n$  é igual ou superior a 4 ( $n \geq 4$ ) (Pereira & Requeijo, 2012). Assim, define-se o seguinte teste,

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_m^2 \quad (2.55a)$$

$$H_1 : \sigma_i^2 \neq \sigma_j^2 \quad \text{para, pelo menos, um par}(i, j) \quad (2.55b)$$

Sendo a estatística de teste dada por,

$$\chi_B^2 = \frac{1}{C} \left( v \ln(S^2) - \sum_{i=1}^m v_i \ln(S_i^2) \right) \quad (2.56)$$

onde,

$$C = 1 + \left( \frac{1}{3(m-1)} \left( \left( \sum_{i=1}^m \frac{1}{v_i} \right) - \frac{1}{v} \right) \right) \quad (2.57)$$

$$S^2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^m v_i S_i^2 \quad (2.58)$$

$$v = \sum_{i=1}^m v_i \quad (2.59)$$

Sendo,  $m$  o número de amostras distintas obtidas a partir das populações,  $n_i$  a dimensão da amostra  $i$ ,  $v_i$  o número de graus de liberdade referentes à amostra de dimensão  $n_i$  e  $S_i^2$  a variância da amostra  $i$ . Por fim, conclui-se que existem diferenças significativas entre as variâncias de  $m$  populações quando,

$$\chi_B^2 > \chi_{\alpha; m-1}^2 \quad (2.60)$$

### 2.2.7.12 Histograma

Muitas vezes, a simples observação dos dados de uma característica da qualidade não permite concluir nada sobre a sua dispersão, ou o seu valor médio. O histograma é um gráfico de barras que ilustra a frequência da ocorrência de uma determinada variável continua ou discreta, pelo que fornece a informação da localização dos valores e a sua dispersão, sendo muitas vezes utilizado para descobrir a forma da distribuição de probabilidades originada pelos dados (Pereira & Requeijo, 2012). Para a construção de um histograma, é necessário definir o número de classes com amplitude igual entre si. Existem duas regras expeditas de achar o número de classes:

$$k = \sqrt{N} \quad (2.61)$$

Sendo,  $N$  o número total de observações, e

$$k = 1 + 3.322 \times \log(N) \quad (\text{regra de Sturges}) \quad (2.62)$$

Onde  $k$  representa o número de classes a aplicar.

Contudo, quando se trata de uma variável discreta, é comum cada valor da variável corresponder a uma classe (Montgomery, 2009).

Repare-se no exemplo apresentado na Figura 2.20, é possível concluir que a distribuição dos valores se dá em torno de um valor médio, pois o maior número de ocorrências acontece na classe central 3. Para que se possa obter uma aproximação fiável da distribuição da população o histograma deve ser construído com base em pelo menos 50 observações (Pereira & Requeijo, 2012).

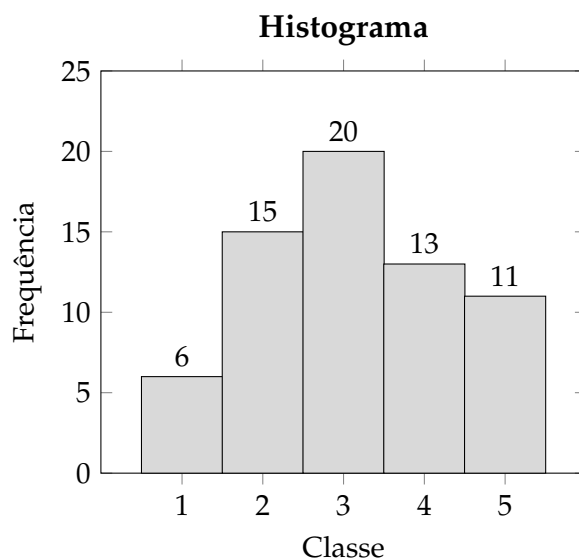


Figura 2.20: Exemplo de um Histograma

### 2.2.7.13 Matriz de Prioridades

A Matriz de Prioridades é uma combinação do diagrama de árvore e o diagrama matricial. É uma ferramenta que tem uma utilidade elevada quando se está perante um conjunto de potenciais soluções e se pretende tomar uma decisão de qual a solução a seguir. Assim, definem-se prioridades perante as soluções em estudo baseadas em critérios de seleção da melhor solução (Pereira & Requeijo, 2012).

Para a construção de uma matriz de prioridades deve-se primeiro identificar quais as soluções ( $S_i$ ) e os critérios pelos quais se vai proceder à priorização ( $C_j$ ). Após a definição dos  $n$  critérios faz-se uma primeira comparação critério a critério onde se atribui uma determinada relação de importância (Tabela 2.19).

Tabela 2.19: Matriz de prioridade dos critérios

	$C_A$	$C_B$	(...)	$C_n$	Total	Ponderação (%)
$C_A$	-					$P_{C_A}$
$C_B$		-				$P_{C_B}$
(...)			-			$\vdots$
$C_n$				-		$P_{C_n}$
Total						

Em seguida faz-se a comparação, para cada critério escolhido, entre as  $m$  soluções em estudo, como apresentado na Tabela 2.20.

Tabela 2.20: Matriz de prioridade das opções para cada critério

$C_j$	$S_1$	$S_2$	(...)	$S_m$	Total	Ponderação (%)
$S_1$	-					$P_{S_1}$
$S_2$		-				$P_{S_2}$
(...)			-			$\vdots$
$S_m$				-		$P_{S_m}$
Total						

Por fim, constroi-se a matriz prioridades onde se relaciona as  $m$  soluções com os  $n$  critérios, calculando os pesos ( $p_{ij}$ ) de cada relação (Tabela 4.32).

Tabela 2.21: Matriz de prioridade das opções para cada critério

	$C_A$	$C_B$	(...)	$C_n$	Importância (%)
$S_1$	$p_{1A}$	$p_{1B}$	$\cdots$	$p_{1n}$	$I_{S_1}$
$S_2$	$p_{2A}$	$p_{2B}$	$\cdots$	$p_{2n}$	$I_{S_2}$
(...)	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
$S_m$	$p_{mA}$	$p_{mB}$	$\cdots$	$p_{mn}$	$I_{S_m}$

Onde,

$$p_{mn} = P_{C_n} \times P_{S_m} \quad (2.63)$$

Sendo a importância ( $I$ ) de cada solução é dada por,

$$\sum_{j=1}^n p_{mj} \quad (2.64)$$

Finalmente, opta-se pela solução que tiver maior importância, descartando as restantes potenciais soluções.

#### 2.2.7.14 VOC - Voice of Customer

A análise VOC pretende reunir as exigências dos clientes quanto aos seus critérios de qualidade de um serviço ou produto, permitindo estabelecer os critérios críticos da qualidade (CTQ - *Critical to Quality*).

Numa análise VOC começa-se por identificar os principais clientes e em seguida procede-se à recolha de informação, com base em entrevistas, reuniões, inquéritos, estudos de mercado, entre outras. Sendo fundamental nesta fase, ouvir, identificar e registar as exigências do cliente, que servirão de base para o ciclo DMAIC.



## APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

### 3.1 Corticeira Amorim

Sendo a maior empresa mundial de produtos de cortiça e das empresas portuguesas com maior representação mundial, a Corticeira Amorim tem grande influência na economia do país. A sua origem data de 1870 e cedo a empresa percebeu o potencial da cortiça enquanto matéria prima. Em 2015, a cortiça em Portugal originou 757.3 milhões de euros em exportações, onde as rolhas de cortiça assumem o valor de 644.4 milhões de euros (71.7%), sendo que este mercado sofreu um crescimento de 8.74% face a 2014 (APCOR, 2016).

A Corticeira Amorim encontra-se representada nos cinco continentes através das suas 29 Unidades Industriais, 44 Empresas de Distribuição, 11 *Joint Ventures* e dos seus 258 Agentes. O seu volume de negócios em 2015 ascendeu aos 748.1 milhões que são repartidos pelos seus 22 000 clientes (Corticeira Amorim, 2015). Conta com 3350 colaboradores divididos pelas cinco principais áreas de negócio (matérias primas, revestimentos, aglomerados compósitos, rolhas e isolamentos), sendo as rolhas a principal área de negócio representando 53% do volume vendas como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Volume de vendas Corticeira Amorim S.G.P.S., S.A. (2015)

Unidade de Negócio	Vendas (M)	%
Rolhas	392,8	53%
Matérias Prima	135,4	18%
Revestimentos	109,8	15%
Aglomerados Compósitos	100,0	13%
Isolamentos	10,0	1%
Total	748,1	100%

O estágio que deu origem a esta dissertação foi realizado na UI-Equipar que se insere na área de negócio das rolhas, como esquematizado na Figura 3.1. Note-se que, a UI-Equipar também conta com uma fábrica que se insere no setor da distribuição, a Equipar Distribuição.

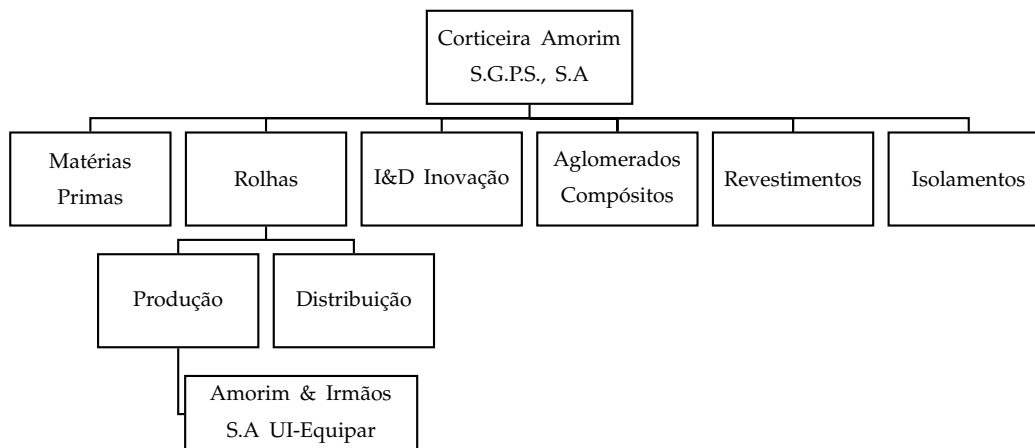


Figura 3.1: Organograma resumido da Corticeira Amorim S.G.P.S., S.A.

Sob o desafio permanente da inovação a empresa investe anualmente cerca de 7,5 milhões de euros em investigação e tecnologia de ultima geração e processos de produção exclusivos. Focando-se na melhoria qualitativa, a empresa aprofunda conhecimentos que potenciem a otimização dos processos existentes e integrem a conceção de novos produtos e negócios. Deste modo, a empresa conta com o departamento Investigação & Desenvolvimento e Inovação (I&D+I) que tem contribuído sucessivamente para o registo de novas patentes em áreas tão dispares como produtos de beleza, fármacos ou componentes para a industria aeroespacial.

## 3.2 UI-Equipar

A UI-Equipar nasceu em finais da década de 90, fruto da cooperação entre vários produtores da região que viram na abundância de matéria prima uma oportunidade de negócio. Desde a sua génese a UI-Equipar foi-se adaptando ao mercado e alterando a sua área de negócio. Numa primeira fase procedia-se apenas ao tratamento e escolha de pranchas de cortiça e trituração para venda de granulados. Contudo, paulatinamente a empresa foi crescendo até que, em 2006, foi comprada pelo grupo Amorim, e redefiniu a sua área de negócio adaptando-se às necessidades do grupo.

Deste modo, hoje em dia, a UI-Equipar abrange várias áreas da produção de rolhas de cortiça, desde a cozedura de cortiça até à marcação de rolhas em produto final. Como apresentado na Figura 3.2 a UI-Equipar engloba um conjunto de quatro fábricas distintas que funcionam em conjunto: Trituração, *Twin Top*, Aglomerada e Equipar Distribuição. Sendo que, a Cozedura e o ROSA, apesar de não serem em pavilhões contíguos, fazem parte da Trituração.

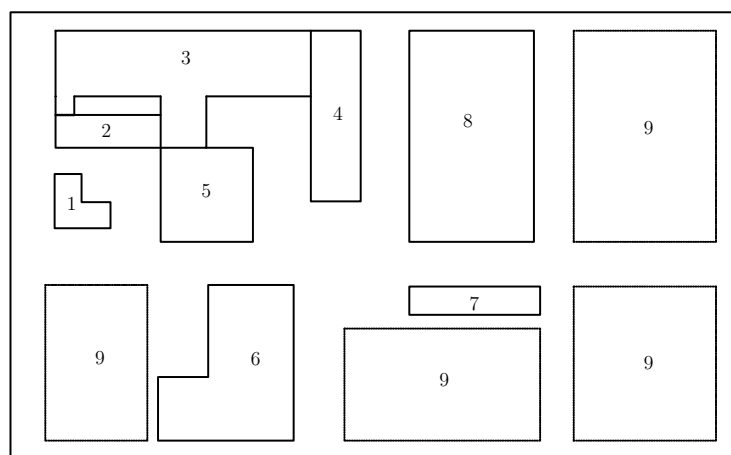


Figura 3.2: Planta UI-Equipar

#### Legenda

1	Escritórios
2	Equipar Distribuição
3	Twin-Top
4	ROSA
5	Armazém Expedição
6	Aglomerada
7	Cozedura
8	Trituração
9	Parques de Armazenamento de Cortiça

Este conjunto de fábricas possibilitam à UI-Equipar possuir uma gama diversificada de produtos e uma vasta carteira de clientes. De facto, existe uma vasta gama de produtos comercializados, contudo pode-se dividir em dois grupos e subgrupos:

- Granulados
- Rolhas
  - Acabadas
  - Semiacabadas

É possível ver na Tabela 3.2 os tipos de granulados produzidos na UI-Equipar. Note-se que, apenas o RCT, RA e RN servem para produzir rolhas aglomeradas, sendo os restantes subprodutos provenientes do processo de Trituração utilizados, essencialmente, na produção de isolamentos e revestimentos para a construção civil.

Tabela 3.2: Tipos de granulados comercializados na UI-Equipar

Produto	Descrição
RCT	Granulado com maior granulometria (3-7 mm)
RA	Granulado com granulometria intermédia (2-3 mm)
RN	Granulado com granulometria fina (1-2 mm))
MD; BD; AD; ADT	Subprodutos provenientes do processo de Trituração

Adaptado de (Gomes, 2015)

Atente-se que, dentro das quatro gamas apresentadas na Tabela 3.3 principais existem inúmeras variações que vão de encontro às necessidades do mercado. Como exemplo tem-se que a rolha *Twin-Top* pode variar tanto em calibre, como na configuração da colagem dos discos, sendo possível obter configurações do tipo "0+1" com apenas um disco colado num dos lados. O mesmo se passa com o *Advantec*, que indo de encontro às especificações do mercado, pode ter cores diferentes consoante o revestimento formando uma sub-gama relativamente recente chamada *Advantec Colours*. É importante referir também, que se considera como rolha acabada uma rolha que passa na Equipar Distribuição para ser marcada com o logo do cliente final. À data da redação deste texto ainda não se marca rolha *Twin-Top* na UI-Equipar, contudo existem esforços para que tal aconteça num futuro próximo.

Tabela 3.3: Tipos de rolhas comercializadas na UI-Equipar

Produto	Descrição	Granulado	Acabada	Semiacabada
Twin-Top	Rolha de corpo aglomerado que posteriormente leva dois discos de cortiça natural nas extremidades	RCT		✓
Aglomerada Espumosos	Rolha de cortiça aglomerada para bebidas gaseificadas nas quais não se exceda pressões a cima de 5 bar	RCT	✓	✓
Aglomerada	Rolha de corpo aglomerado ideal para vinhos de consumo rápido, sendo o seu preço reduzido a sua mais-valia	RA	✓	✓
Advantec	Rolha de corpo aglomerado contendo granulado que foi submetido a um tratamento cuidado para remoção de TCA	RA	✓	✓

Adaptado de (Dinis, 2014)

Em suma, exemplifica-se na Figura 3.3 o processo produtivo base da UI-Equipar, tendo consciência que, devido às exigências do mercado, existe uma grande flexibilidade produtiva pelo que, o fluxograma apresentado seja apenas uma representação aproximada da realidade.

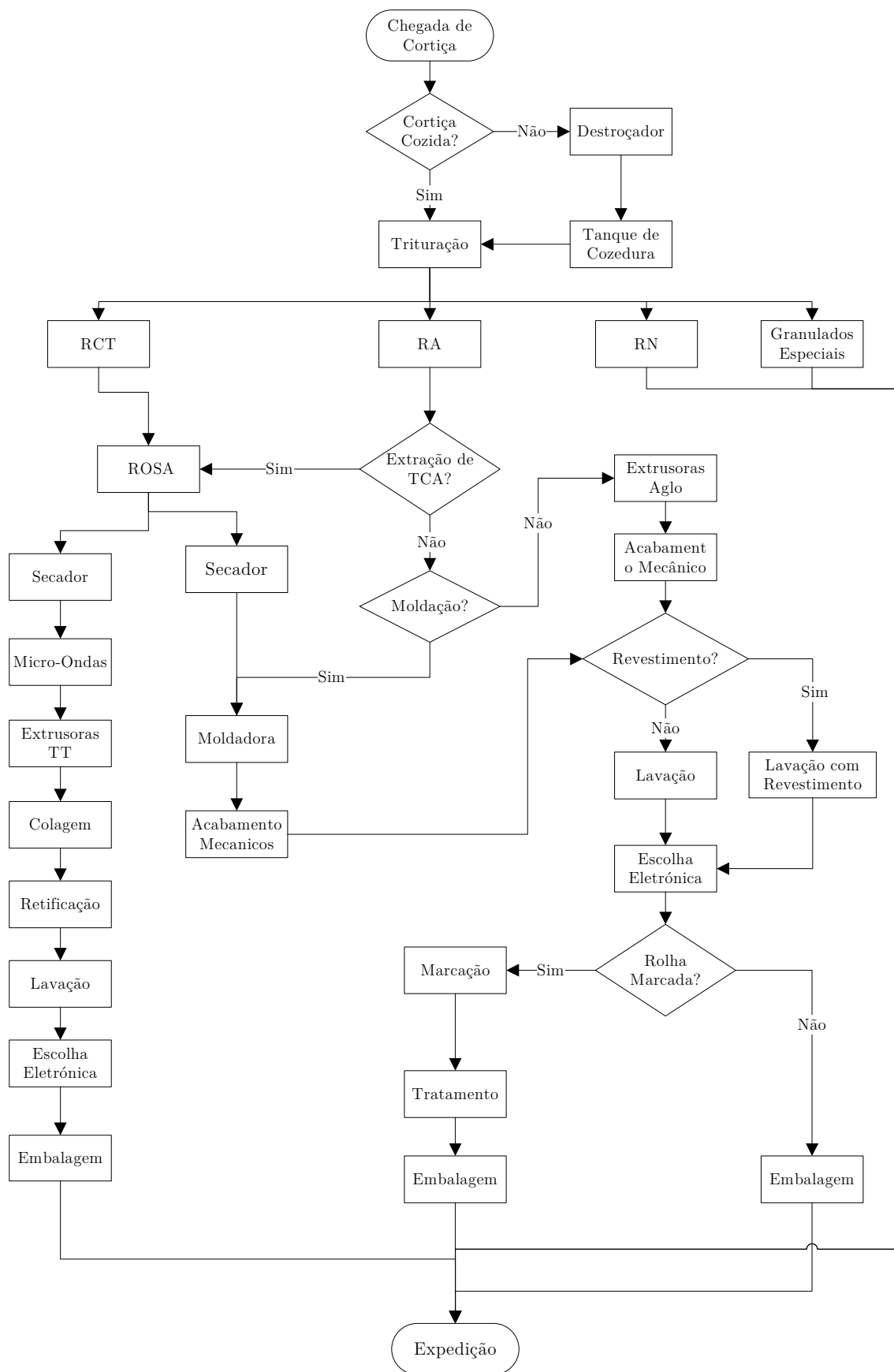


Figura 3.3: Fluxograma produtivo UI - Equipar

### 3.3 Processo de Moldação

#### 3.3.1 Caracterização geral do processo

Como explicado anteriormente existem dois processos distintos para aglomeração de um corpo: extrusão e moldação. Esta dissertação centra-se no processo de moldação. A moldação é executada em Equipamentos específicos (Figura 3.4) que possuem características mecânicas e informáticas que facilitam a automação e eficiência do processo produtivo.

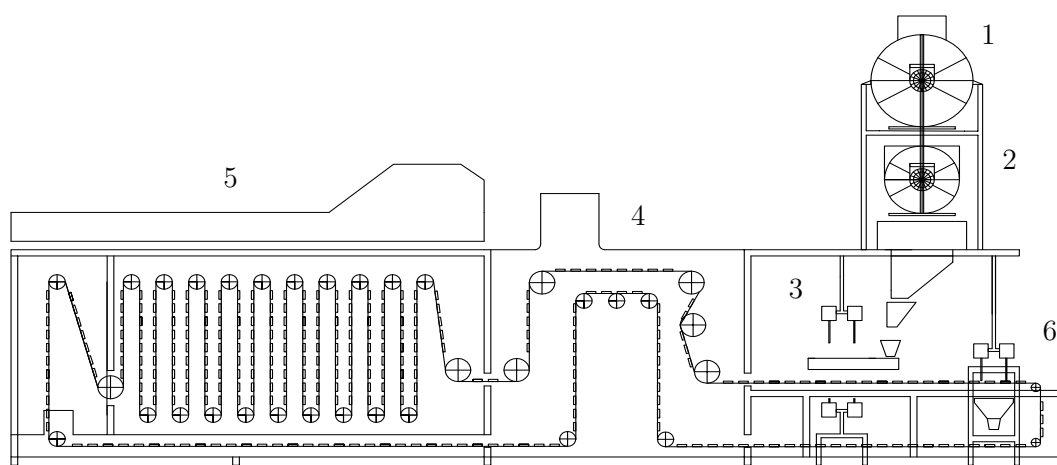


Figura 3.4: Representação em corte do Equipamento

Legenda	
1	M.S
2	M.I
3	Z.P
4	Forno 1
5	Forno 2
6	Z.E

O Equipamento subdivide-se em seis zonas distintas. Numa primeira fase é formulada a mistura no M.S (1), com base na receita e tempos programados, apresentada na Tabela 3.4. Finda a formulação da mistura a mesma é transferida para o M.I (2), onde fica em espera até passar à Z.P (3). Deste modo, possibilita esvaziar o M.S para que se realize nova mistura enquanto a anterior está a ser consumida. Após prensagem no molde, o mesmo percorre um circuito entre o Forno 2 (5), que tem uma função catalisadora no processo químico da aglomeração, e o Forno 1 (4), que contrariamente, tem uma função inibidora para que se controle o processo de aglomeração para a posterior extração do corpo na Z.E (6).

Tabela 3.4: Formulação da mistura no processo de Moldação

Ordem	Mistura	Quantidades (kg)	%	MV ( $kg/m^3$ )	Tempo Programado (s)
1º	Ingrediente 1	$\simeq 41.300$	-	var.	-
2º	Ingrediente 2	-	14%	1000	100
3º	Ingrediente 3	$\simeq 6.195$	15%	1060	180
4º	Ingrediente 4	$\simeq 1.156$	2%	900	80

Como referido anteriormente o Equipamento possui mecanismos que possibilitam o acerto automático consoante a quantidade de Ingrediente 1 inserida. Isto é, conforme a Tabela 3.4, primeiramente é pesada a quantidade de Ingrediente 1 pretendida em balanças nas quais o M.S está assente. Conforme a quantidade inserida o Equipamento acerta automaticamente a quantidade de Ingrediente 3 (15%) e de Ingrediente 4 (2%). O processo de acerto da quantidade de Ingrediente 2 é semelhante, contudo o mesmo depende da característica 5 presente no ingrediente 1 à entrada, pelo que, o operador dá essa indicação ao Equipamento e é feito o acerto para 14%.

### 3.3.2 Caracterização do funcionamento do Equipamento

Feita caracterização global do processo é necessário fazer uma descrição mais pormenorizada para facilitar a compreensão do Equipamento em si como de eventuais descrições ao longo do presente texto.

Uma variável bastante importante no processo é o tempo de exposição às condições presentes nos fornos. Contudo, a única variável de tempo que é possível controlar no Equipamento é o tempo de ciclo ( $t_c$ ), que representa o tempo de avanço da corrente, ou seja o tempo necessário à extração e prensagem dos respetivos moldes. Deste modo, o tempo de permanência nos respetivos fornos depende diretamente, tanto do tempo de ciclo como da configuração do percurso da corrente. Deste modo, é possível ter uma estimativa dos diversos tempos fazendo a contagem do número de moldes presentes em cada área, e assumindo um  $t_c = 9s$ , chega-se aos tempos apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Tempos de permanência nas zonas do Equipamento

	Nº Moldes	Tempo de Permanência ( <i>min</i> )
Forno 1 (ida)	20	00:01:30
Forno 1 (volta)	25	00:01:52
Forno 2	169	00:12:41
Transição entre Fornos	21	00:01:34
Z.E	31	00:02:20
Total	266	00:19:57

Outro aspeto crítico no processo de moldação é a prensagem no molde. Como representado na Figura 3.5 primeiramente é feito o enchimento do "Armazém"(a), de seguida a mistura é prensada dentro do molde com recurso a pistões (b), feita a prensagem, o

molde é fechado (c) e segue para as passagens pelos fornos. Repara-se que existe uma relação entre o comprimento do "armazém" e o comprimento do molde, a esta relação chama-se Taxa de Compressão (TC). Para alterar a TC utilizam-se calços de 5 mm, sendo o comprimento do "armazém" ( $h$ ) mínimo de 148 mm.

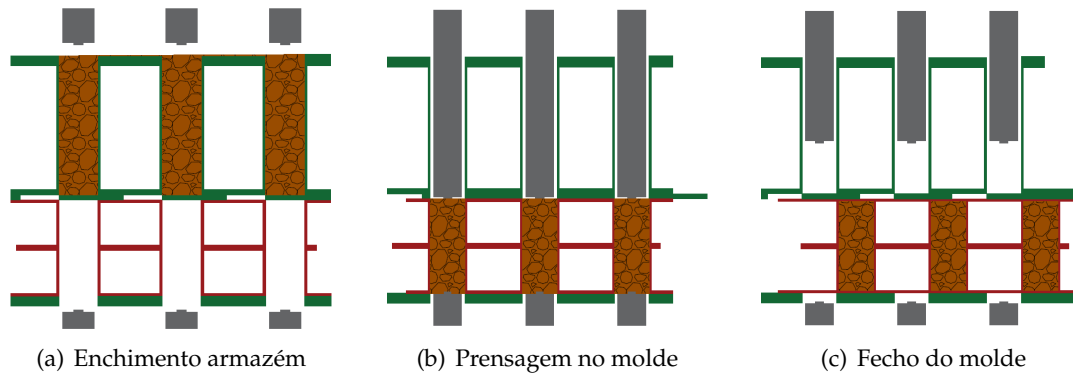


Figura 3.5: Pormenor da prensagem no molde

### 3.3.3 Controlo do processo efetuado

Sendo o processo de moldação relativamente recente na UI-Equipar, o processo apresenta um controlo apertado de forma a restringir da melhor forma a variabilidade inerente ao processo de aglomeração de um corpo de cortiça. Neste sentido, está previsto a recolha de amostras de oito rolhas de duas em duas horas para medir quatro características da qualidade: característica 1, característica 2, característica 3, característica 4, característica 5. Os respetivos limites de especificação encontram-se em resumo na Tabela 3.6. O controlo é efetuado por um MedCork (Figura 3.6) que é um sistema inteligente e integrado, totalmente automático, cumprindo com técnicas metrológicas rigorosas e com as normas existentes (Egitron, 2008).



Figura 3.6: Aparelho de medição automática MedCork



Tabela 3.6: Características da qualidade e limites de especificação

Característica da Qualidade	Limites de Especificação		Unidades
	LIE	LSE	
Característica 1	39,5	45,7	mm
Característica 2	25,8	27,8	mm
Característica 3	6,0	7,2	g
Característica 4	270	290	kg/m <sup>3</sup>
Característica 5	9	11	%

Em suma, a moldação é um processo com um grande potencial, pelas suas características intrínsecas que permitem um processo totalmente automatizado sem a necessidade de mão de obra especializada. No entanto, na UI-Equipar ainda existe algum desconhecimento do processo em si, do comportamento mecânico do Equipamento e dos melhores valores para as variáveis controláveis. Esta dissertação vai de encontro à necessidade de inverter esta condição, fazendo um estudo aprofundado sobre o processo.

### 3.4 Acabamentos Mecânicos

A próxima etapa produtiva são os Acabamentos Mecânicos, conforme pode ser visto na Figura 3.3. Nesta etapa produtiva é onde se confere ao corpo de rolha aglomerada a sua forma final, como é do conhecimento geral.



(a) Ponçamento



(b) Topejamento



(c) Chanframento

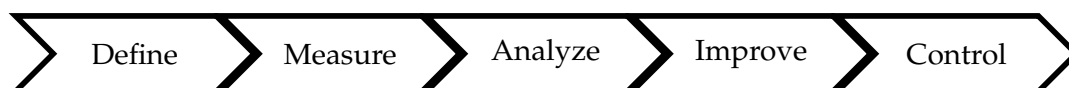
Figura 3.7: Sequência do processo de Acabamentos Mecânicos

Numa primeira fase o corpo passa por uma ponçadeira (a) onde a superfície lateral é alisada até atingir o diâmetro pretendido. Posteriormente, com o intuito de conferir o comprimento correto à rolha o corpo passa por duas lixas que estão distanciadas pelo comprimento pretendido (b). Esta etapa é bastante importante no processo global, uma vez que corpos que não tenham o comprimento correto ou o topo bastante enviesado tendem a produzir defeitos de topejamento. Por fim, a última etapa do processo é o chanframento

que tem por objetivo amenizar as arestas dos topos da rolha para facilitar a inserção e extração em garrafa.

## CASO PRÁTICO

Esta dissertação centra-se na aplicação do Seis Sigma nas suas vertentes de metodologia e métrica. Para tal, o estudo centrou-se no processo produtivo de moldação da UI-Equipar, fazendo um estudo aprofundado do processo e todas as suas vertentes, desde o controlo do processo efetuado até ao fenómeno de aglomeração de um corpo de cortiça. Este estudo teve por base o ciclo DMAIC, pelo que se apresenta todo o trabalho desenvolvido em cada fase.



### 4.1 Define

A fase *Define* (Figura 4.1) é a primeira do ciclo DMAIC. Nesta primeira fase os principais objetivos são a definição do projeto, perceber qual ou quais os processos envolvidos, perceber qual o problema e quais as metas a atingir. Do mesmo modo, é necessário definir a equipa de trabalho, quais as funções de cada elemento e definir cronologicamente o projeto. Finalmente, é fundamental definir concretamente quem é o cliente do projeto e quais os seus requisitos e especificações. É possível ver na Tabela 4.1 um resumo do trabalho desenvolvido nesta fase, bem como as ferramentas da qualidade utilizadas.

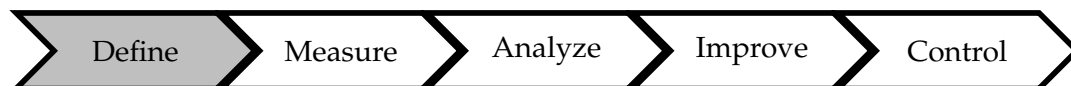


Figura 4.1: Fase *Define* do ciclo DMAIC

Tabela 4.1: Ferramentas utilizadas na fase *Define*

<i>Define</i>	
Objetivo	Ferramenta utilizada
Seleção do Projeto	TOPSIS
Descrição e documentação do objetivo geral do projeto e responsabilidades dos vários elementos	<i>Project Charter</i>
Identificação das características críticas da qualidade e exigências do cliente	VOC e CTQ
Conhecimento geral do processo envolvido no projeto	SIPOC

#### 4.1.1 Seleção do projeto

Numa primeira fase a equipa reuniu-se com o intuito de fazer um levantamento dos principais problemas que afetavam o processo de moldação. Foram então considerados como prioritários três principais problemas como é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Principais Problemas Moldadora

Alternativas ( $i$ )	Potenciais Projetos
$i_1$	Corpos curtos
$i_2$	Perda de granulado
$i_3$	Produtividade

Após o levantamento dos potenciais projetos foi necessário prioriza-los através de um modelo de decisão (TOPSIS). Para tal a equipa elegeu quatro critérios principais, e os seus respetivos pesos, como sendo críticos para o correto funcionamento do processo como é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Critérios de seleção e Pesos

	Critérios ( $j$ )	Pesos
$j_1$	Impacto na Produção	0.2
$j_2$	Impacto na Qualidade	0.4
$j_3$	Interesse para a Entidade	0.3
$j_4$	Custo do Projeto	0.1

Seguidamente foi necessário estabelecer relações entre as três alternativas e os quatro critérios de seleção. Foi pedido a cada elemento da equipa que atribuisse uma pontuação entre 1 e 10, sendo que 1 representaria uma fraca relação e 10 uma forte relação entre a alternativa e o critério correspondente. Deste modo, chegou-se à matriz de atributos apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Matriz de atributos

Alternativa	Critério			
	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
$i_1$	6	7	8	6
$i_2$	4	5	4	7
$i_3$	8	5	5	6
$\sum_{i=1}^3 f_{ij}$	116	99	105	121

Normalizando os valores como apresentado na Equação 4.1, para o exemplo de  $r_{11}$ , construiu-se a matriz normalizada apresentada na Tabela 4.5,

$$r_{11} = \frac{6}{\sqrt{116}} = 0.557 \quad (4.1)$$

Tabela 4.5: Matriz de atributos normalizada

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
$i_1$	0.557	0.704	0.781	0.545
$i_2$	0.371	0.503	0.390	0.636
$i_3$	0.743	0.503	0.488	0.545

Multiplicando os valores de  $r_{ij}$  pelos respectivos pesos de cada critério  $j$  chega-se á matriz normalizada ponderada (Tabela 4.6).

Tabela 4.6: Matriz de atributos normalizada ponderada

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
$i_1$	0.111	0.281	0.234	0.055
$i_2$	0.074	0.201	0.117	0.064
$i_3$	0.149	0.201	0.146	0.055

Através do tratamento dos dados efetuado no Anexo B.1 chegou-se aos valores da Tabela 4.7. Note-se que, neste caso a melhor alternativa será a que minimizar os critérios  $j_1, j_2, j_4$ , e que, por outro lado, maximizar  $j_3$ .

Tabela 4.7: Priorização dos alternativas de projeto

Alternativa	Proximidade Relativa $C_j$
$i_1$	0.582
$i_2$	0.482
$i_3$	0.428

Assim, uma vez que a alternativa  $i_1$  é a que apresenta um valor de  $C_j$  mais próximo de um, a equipa decidiu que o problema "corpos curtos" seria o âmbito do projeto a desenvolver.

### 4.1.2 Declaração do projeto: *Project Charter*

Escolhido o âmbito do projeto foi necessário oficializa-lo num documento para que toda a equipa compreendesse o âmbito, a missão e o papel a desempenhar no desenvolvimento do projeto. Para tal, compilou-se a toda a informação num *Project Charter*, onde foram registadas informações como as datas de início e conclusão do projeto, missão e âmbito do projeto, descrição breve do problema, meta a atingir, restrições e suposições, constituição da equipa e as suas funções e por fim o cronograma pelo qual se regeu o ritmo do projeto.

Tabela 4.8: *Project Charter* - Declaração do projeto

Nome do Projeto			
Aplicação do Seis Sigma na Industria da Cortiça - Caso de Estudo Corticeira Amorim			
Data de inicio	1-01-2016	Data de término	31-07-2016
Empresa	Corticeira Amorim – Unidade Industrial Equipar		
Missão do projeto			
A Moldação é um processo relativamente recente na UI Equipar. Não se conhecendo ainda bem qual a parametrização necessária para o correto funcionamento do mesmo, pretende-se aprofundar o conhecimento do processo em si e chegar aos valores dos parâmetros que conduzam ao seu melhor funcionamento. Para tal, recorrer-se-á à filosofia Seis Sigma como metodologia e como métrica, utilizando o ciclo DMAIC e as diversas ferramentas associadas a cada uma das suas fases, como linha guia do projeto.			
Âmbito do projeto			
O âmbito do projeto será o processo produtivo Moldação, passando por analisar o estado atual do processo, análise das causas dos problemas, implementação de ações corretivas e posteriormente o controlo e análise do processo.			
Descrição do problema			
A incorreção na parametrização do processo e o desconhecimento da real influência das variáveis envolvidas leva a que haja grande variabilidade. O controlo de qualidade efetuado na referida etapa produtiva não tem capacidade de detetar os potenciais defeitos, fazendo com que estes apenas sejam detetados na ultima etapa do processo produtivo.			
Definição da meta			
Pretende-se com este projeto a redução da percentagem de defeitos para valores abaixo de 1% o que na métrica de nível sigma equivale a atingir um nível sigma superior a 4.			
Restrições e suposições			
Com a maior exigência do mercado, a especificidade das encomendas tem vindo a ser cada vez maior o que faz com que a Moldadora produza corpos com diferentes tipos de granulado. Com intuito de reduzir a variabilidade entre granulados o presente projeto apenas se centrará no tipo de granulado RA com extração de TCA, visto este ser o tipo de granulado mais utilizado no processo de moldação.			
Equipa de trabalho			
Nome	E-mail	Responsabilidade	
Maria Cortez	mcortez.eq@amorim.com	Coordenadora do projeto	
Luís Fontainhas	lfontainhas.eq@amorim.com	Técnico superior	
Eduardo Dinis	edinis.eq@amorim.com	Técnico superior	
Micael Dinis	mdinis.eq@amorim.com	Assistente de processo	
Isilda Gagueja	igagueja.eq@amorim.com	Assistente de produção	
José Requeijo	jfgr@fct.unl.pt	Orientador global do projeto	
Diogo Pinto	dg.pinto@campus.fct.unl.pt	Elemento pivot	

### 4.1.3 Características críticas da qualidade para o cliente

Para uma correta abordagem ao problema é necessário reconhecer quais os requisitos específicos do cliente (VOC, *Voice of Customer*), e quais são as características críticas da qualidade (CTQ, *Critical To Quality*) para um correto funcionamento. O principal cliente do processo de moldação são os Acabamentos Mecânicos. Nesse sentido, em reunião com o operador responsável por essa etapa produtiva foi possível reunir quais as razões dos principais problemas provenientes da moldação.

1. Corpos curtos encavram a "estrela" que abastece as lixas de Topejamento, acabando pelo corpo ser topejado numa posição incorreta;
2. Corpos com topo enviesado não topejam de forma uniforme;
3. Corpos demasiado grandes encravam a máquina de Topejamento e Chanframento.

### 4.1.4 SIPOC

Por fim, elaborou-se um diagrama SIPOC (Tabela 4.9) com o intuito de esclarecer todos os elementos da equipa Seis Sigma das etapas do processo alvo do projeto e de todas as entidades e matérias primas envolvidas no mesmo. É de notar que apesar de existirem três clientes, os Acabamentos Mecânicos têm um papel fundamental nas especificações e requisitos da qualidade do processo uma vez que são a próxima etapa produtiva que dá a forma final ao corpo de rolha aglomerada, *Output* do processo em estudo.

Tabela 4.9: Diagrama SIPOC

<i>Supplier</i> (Fornecedor)	<i>Inputs</i> (Entradas)	<i>Process</i> (Processo)	<i>Output</i> (Saídas)	<i>Customer</i> (Cliente)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ROSA</li> <li>• Fornecedor de Ingrediente 3</li> <li>• Fornecedor de Ingrediente 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingrediente 1</li> <li>• Ingrediente 2</li> <li>• Ingrediente 3</li> <li>• Ingrediente 4</li> </ul>	<pre> graph TD     A([Formulação da Mistura]) --&gt; B[Prensagem do Molde]     B --&gt; C[Forno 1]     C --&gt; D[Forno 2]     D --&gt; E[Forno 1]     E --&gt; F([Extração do Molde])           </pre>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corpo de rolha aglomerada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acabamentos Mecânicos</li> <li>• Lavação</li> <li>• Escolha Eletrónica</li> </ul>

## 4.2 Measure

A segunda fase do ciclo DMAIC é a fase *Measure* (Figura 4.2), nesta fase o principal objetivo é quantificar e medir o estado atual do processo em estudo. Assim, recolhem-se dados do processo e analisam-se, recolhe-se também toda a informação relevante inerente ao processo, como as principais atividades e quem é responsável por essas atividades. O trabalho desenvolvido nesta fase, é de extrema importância, pois servirá como base para todo trabalho desenvolvido no restante ciclo. Na Tabela 4.10 é possível ver as atividades desenvolvidas nesta fase e as suas ferramentas associadas.



Figura 4.2: Fase *Measure* do ciclo DMAIC

Tabela 4.10: Ferramentas utilizadas na fase *Measure*

<i>Measure</i>	
Objetivo	Ferramenta utilizada
Comparação entre Equipamentos	Teste p
Recolha e tratamento dos dados	Carta Laney p'
Identificação da sequência de atividades e respetivas responsabilidades	Mapa de Processo
Quantificação do desempenho atual do processo	Cálculo do nível sigma

### 4.2.1 Comparação entre Equipamentos para a proporção de defeituosos

Visto haver dois Equipamentos semelhantes na UI-Equipar foi necessário compreender se os dois produziam a mesma proporção de defeituosos. Para tal realizou-se um Teste de Hipótese para a proporção de defeituosos entre Equipamentos. Retiraram-se 100 corpos de ambas os Equipamentos, e mediram-se as extremidades, utilizando um paquímetro, considerou-se a diferença entre as extremidades a *flecha* (Figura 4.3). Sendo o *LIE* do Equipamento 1 de 45,5 mm e do Equipamento 2 de 39,5 mm para a característica da qualidade 1, considerou-se como defeituoso o corpo que apresentava um valor abaixo desses valores na sua extremidade menor (*lm*).

Assim, considerando os dados que se apresentam na Tabela C.1 foi possível estimar a proporção de defeituosos de ambas os Equipamentos, que se apresenta na Tabela 4.11.



Tabela 4.11: Proporção de defeituosos dos Equipamentos

	Equipamento 1	Equipamento 2
$n$	100	100
$X_i$	11	23
$p_i$	0,11	0,23

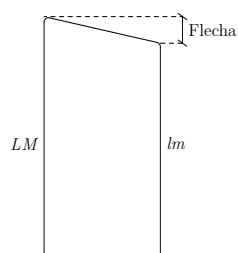


Figura 4.3: Representação de um corpo de rolha aglomerada com topo enviesado

Uma vez verificada a normalidade dos dados através do estudo apresentado no Anexo C.2, procedeu-se à formulação do seguinte Teste de Hipótese,

$$H_0 : p_1 = p_2$$

$$H_1 : p_1 \neq p_2$$

Sendo  $\hat{p} = 0.17$ , chega-se ao seguinte valor de  $Z_0$ ,

$$Z_0 = \frac{0.11 - 0.23}{\sqrt{0.17(1 - 0.17)(\frac{1}{100} + \frac{1}{100})}} = -2.26 \quad (4.2)$$

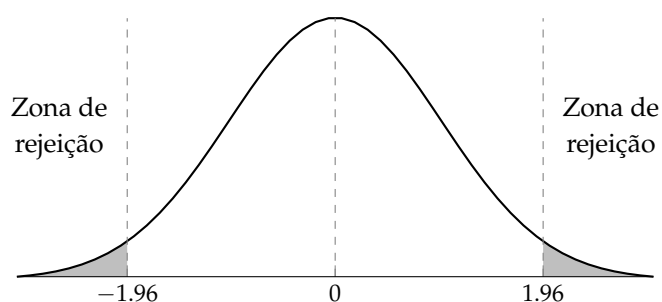


Figura 4.4: Distribuição Normal com Áreas de Rejeição

Com  $\alpha = 0.05$  tem-se que  $Z_{critical} = 1,96$  pela Tabela A.2, como  $Z_0 < Z_{critical}$  rejeita-se a hipótese nula o que confirma que estatisticamente existem diferenças na produção de defeituosos entre as moldadoras. Assim, a equipa de projeto Seis Sigma decidiu que o projeto centrar-se-ia especificamente no Equipamento 2, visto ter uma maior produção de defeituosos.

### 4.2.2 Carta Laney p'

Sendo o nível sigma determinado a partir de uma proporção de defeituosos, decidiu-se recorrer a uma carta de atributos para chegar à proporção média de defeituosos. Utilizou-se o diagrama apresentado na Figura 2.19 para escolher a carta de controlo adequada ao caso em estudo. Para verificar a existência de sobredispersão utilizou-se o teste de diagnóstico do *software* Minitab que indica qual a carta de controlo de atributos mais adequada aos dados existentes (Anexo C.3.0.1) Uma vez que existem evidências de sobredispersão optou-se por utilizar uma Carta Laney p' com base em 20 amostras retiradas do registo da Escolha Eletrónica.

Recorrendo ao *software* Excel para execução dos cálculos e à ferramenta de desenho TikZ para construção das cartas, procedeu-se à remoção dos *Outliers*, como apresentado no Anexo C.3.0.2, chegando-se à carta apresentada na Figura 4.5.

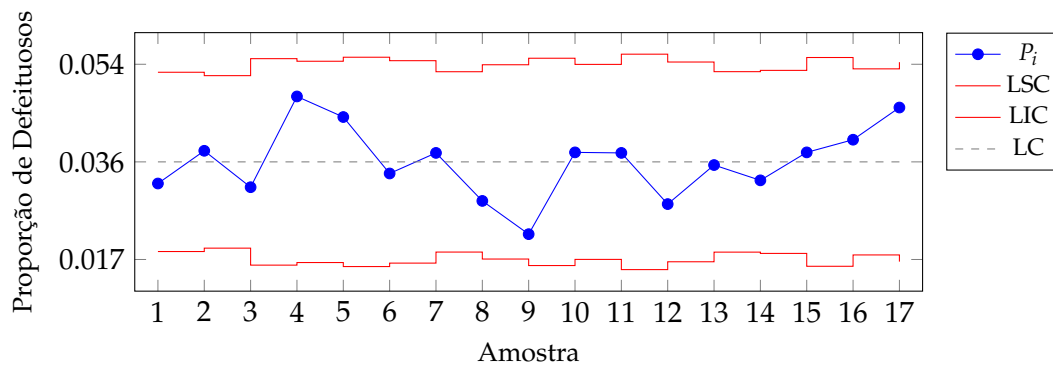


Figura 4.5: Carta Laney p'

Como se constata, a proporção média de defeituosos é  $\bar{p} \simeq 0.036$ . Assumindo que o Equipamento 2 produz apenas um tipo de defeito, corpo curto, conclui-se que  $\bar{p} = DPO$  pelo que se está em condições de calcular os *DPMO* do processo.

$$DPMO = \bar{p} \times 10^6 \quad (4.3)$$

$$DPMO = 0.0359 \times 10^6 = 35900 \quad (4.4)$$

Consultando a Tabela A.1 está-se em condições de determinar qual o nível sigma do processo em estudo.

Tabela 4.12: Nível Sigma

DPMO	Nível Sigma
35900	3,3

### 4.2.3 Mapa de processo da moldação

A compreensão de todas as etapas do processo em estudo é de grande importância nesta fase do estudo, pois na etapa que se segue (*Analyse*) é necessário que todos os elementos do grupo de trabalho conheçam ao pormenor todas as atividades que o processo desencadeia e quem são os intervenientes do mesmo. Deste modo, através do conhecimento pormenorizado do processo, facilitar-se-á a geração de ideias para a causa do problema em estudo.

Posto isto, elaborou-se um Mapa de Processos do processo a moldação, incluindo também, as atividades realizadas a montante e a jusante, conforme apresentado na Figura 4.6.

## 4.3 Analyze

A fase *Analyze* (Figura 4.7) tem como objetivo identificar as causas potenciais do problema. A equipa de projeto analisa os dados recolhidos na fase *Measure* ou através da recolha de novos dados procede à identificação das possíveis causas do problema. Após identificadas, faz-se uma triagem de quais as causas mais importantes, de forma a aplicar melhorias na fase *Improve*. Na Tabela 4.13, apresenta-se um resumo do trabalho desenvolvido nesta fase.

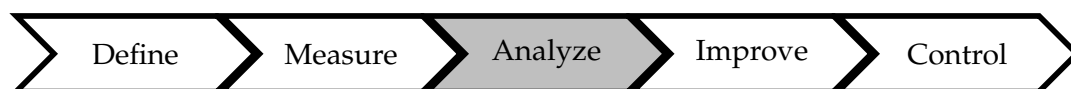


Figura 4.7: Fase *Analyze* do ciclo DMAIC

Tabela 4.13: Ferramentas utilizadas na fase *Analyze*

<i>Analyze</i>	
Objetivo	Ferramenta utilizada
Geração de ideias para causas potenciais do problema	<i>Brainstorming</i>
Organização das causas potenciais do problema	Diagrama de causa-efeito
Estudo da configuração mecânica do Equipamento	Histograma
Análise da capacidade do controlo de processo	Estudo da repetibilidade

### 4.3.1 Reunião para gerar ideias sobre as causas potenciais do problema

Numa primeira fase a equipa de projeto reuniu-se com o intuito de gerar ideias sobre as potenciais causa do problema, os corpos com comprimento escasso. Com base no conhecimento do processo, cada elemento contribuiu com a sua opinião sobre quais as causas que seriam mais relevantes. Todas as ideias foram registadas promovendo assim a criatividade, e ao mesmo tempo incentivando cada elemento a dar o seu contributo.

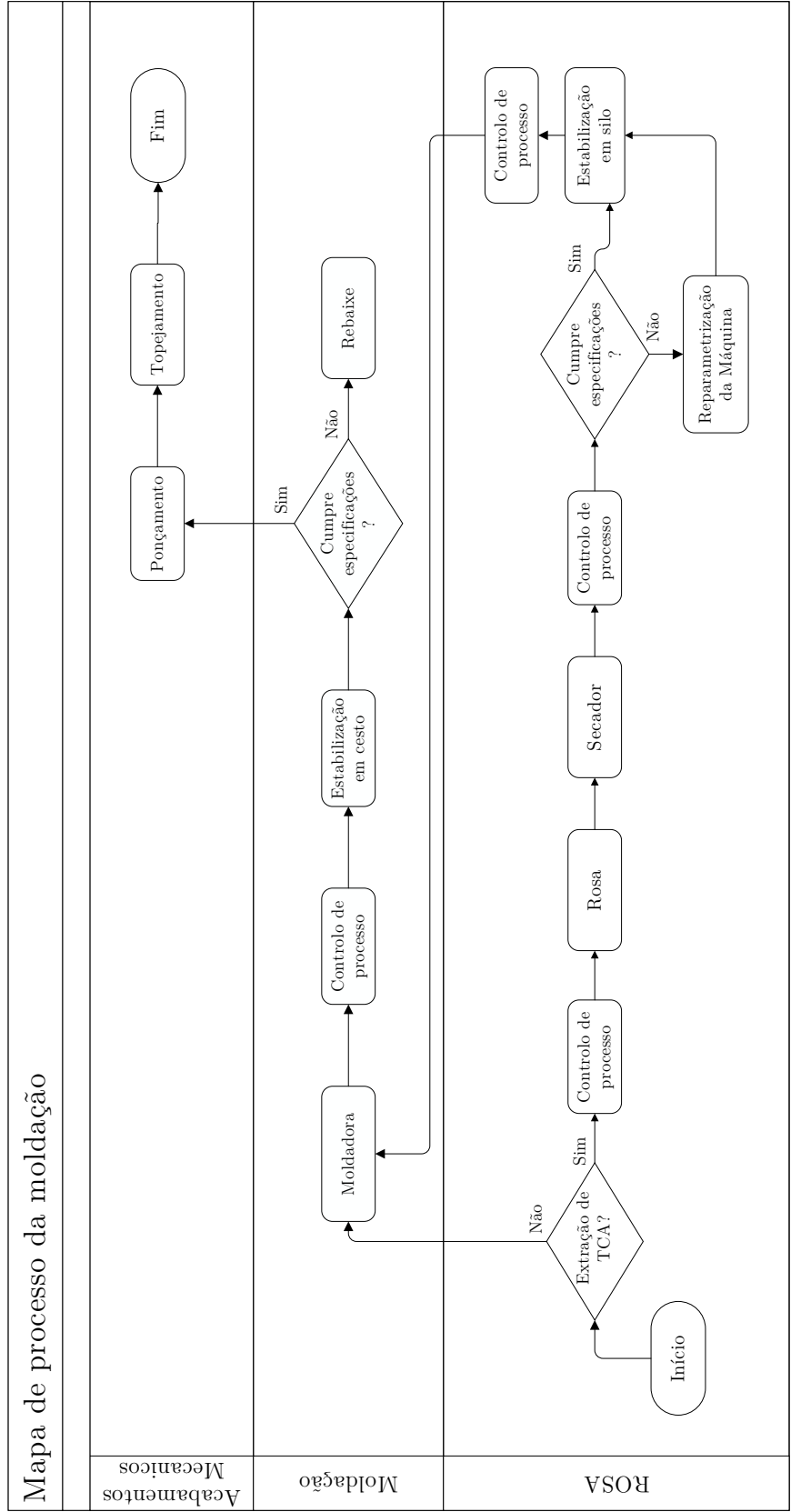


Figura 4.6: Mapa de processos moldação

Foram registadas as seguintes ideias:

1. Parametrização errada
2. Sujidade nos moldes
3. Falta de sincronia entre os movimentos de prensagem
4. Taxa de compressão incorreta
5. Topo enviesado
6. Ingrediente 1 com característica 5 alta
7. Ingrediente 1 com característica 4 alta
8. Retração dos corpos após estabilização
9. Desgaste dos moldes
10. Perda excessiva de Ingrediente 1
11. Percentagens da receita
12. Controlo de processo ineficiente
13. Tempo de exposição às temperaturas dos fornos

Registadas todas as ideias foi necessário agrupá-las de forma a perceber se havia alguma relação entre as várias causas apresentadas. Nesse sentido, recorreu-se a um diagrama de causa-efeito.

#### **4.3.2 Diagrama espinha de peixe**

Após a geração das ideias sobre as potenciais causas do problema foi elaborado um diagrama de causa-efeito com o intuito de centralizar todas essas possíveis causas com o principal problema. Deste modo, a equipa de projeto tem uma noção mais rigorosa do relacionamento das causas com o efeito.

Foram consideradas quatro categorias principais: controlo de processo, meio ambiente, matéria prima e equipamento. Na Figura 4.8 é possível ver a representação gráfica do diagrama de causa-efeito, com as causas de nível 1 e as respetivas causas de nível 2 que potencialmente justificam as primeiras. Repara-se que as causas de nível 1 apresentadas no diagrama, não são as levantadas na sessão de *Brainstorming*, tal deve-se às semelhanças entre algumas potenciais causas o que permite que sejam agrupadas numa causa comum.

#### **4.3.3 Avaliação da taxa de compressão**

Como referido em 3.3.2, existe uma relação entre o tamanho do "armazém" e o tamanho do molde, chamada *taxa de compressão*. Esta relação advém da necessidade de depositar no "armazém" a quantidade de mistura necessária para que o corpo de rolha aglomerada cumpra as especificações.

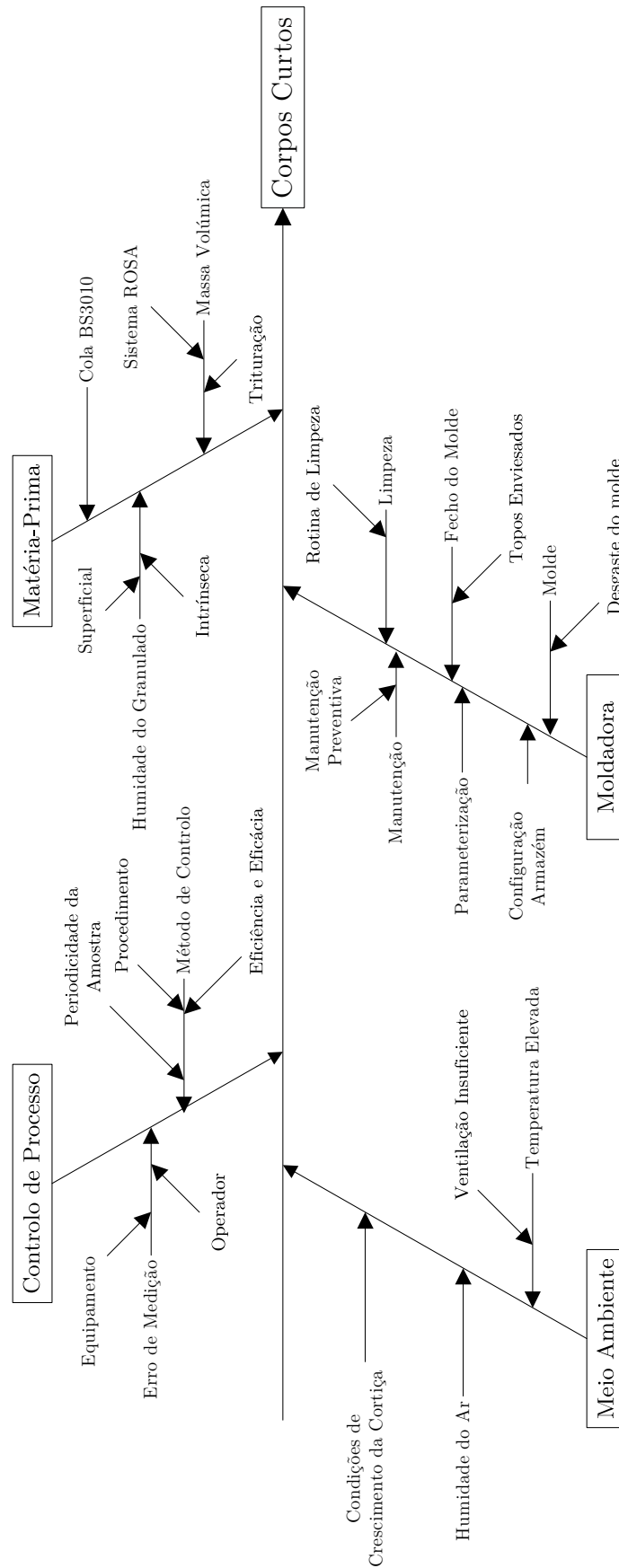


Figura 4.8: Diagrama causa-efeito

De facto, esta relação é essencial no bom funcionamento do Equipamento, pois taxas de compressão muito elevadas levam a maior desgaste mecânico dos componentes. Neste sentido, realizou-se um pequeno estudo para aferir qual a taxa de compressão ideal para o bom funcionamento e, ao mesmo tempo, cumpra as especificações do corpo de rolha aglomerada.

Sabe-se pela Tabela 3.6 que um corpo de rolha aglomerada deve ter uma Característica 4 compreendida entre  $270$  e  $290 \text{ kg/m}^3$  e uma Característica 5 de  $9$  e  $11\%$ . Do mesmo modo, a sua Característica 1 média deve rondar os  $42 \text{ mm}$  e a Característica 2 média os  $27 \text{ mm}$ , assim tem-se como objetivo um corpo com estas dimensões, pelo que o volume do corpo vem dado por,

$$V_{\text{corpo}} = \pi \times \left(\frac{27}{2}\right)^2 \times 42 = 24035.13 \text{ mm}^3 \quad (4.5)$$

utilizando o valor médio da Característica 4 ( $280 \text{ kg/m}^3$ ) tem-se o peso médio que um corpo necessita ter para cumprir as especificações:

$$m_{\text{corpo}} = 24035.13 \times 280 \times 10^{-6} = 6.7 \text{ g} \quad (4.6)$$

Repare-se que este cálculo considerou uma Característica 5 média de  $10\%$ . Uma vez que o Equipamento acerta a mistura para  $14\%$  de característica 5, a massa mínima do corpo será dada por  $6.6 \times 1.04 = 7.0 \text{ g}$ . Assim, sabe-se que o "armazém" necessita ter o volume suficiente para conter pelo menos  $7.0 \text{ g}$  de mistura. Sabe-se também, que o diâmetro do "armazém" é fixo ( $d = 26 \text{ mm}$ ) e que a quantidade de mistura necessária para perfazer as  $7.0 \text{ g}$  depende diretamente da sua Massa Volúmica ( $MV_{\text{mistura}}$ ).

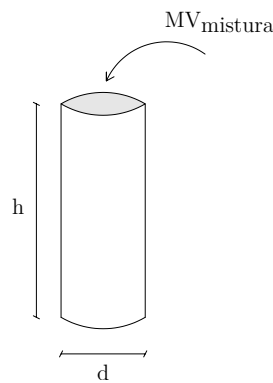


Figura 4.9: Esquema do volume do armazém

Sendo a  $MV_{\text{mistura}}$  dada por,

$$MV_{\text{mistura}} = \frac{m_{\text{Ing.2}} + m_{\text{Ing.3}} + m_{\text{Ing.1}} + m_{\text{Ing.4}}}{v_{\text{Ing.2}} + v_{\text{Ing.3}} + v_{\text{Ing.1}} + v_{\text{Ing.4}}} \quad (4.7)$$

Vem que,

$$h = \frac{7.0}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \times \pi \times MV_{mistura} \times 10^{-6}} \quad (4.8)$$

Atendendo ao exposto anteriormente na Tabela 3.4, sabe-se que o Equipamento insere cerca 41.3 kg de Ingrediente 1, acerta a mistura para 14 % de humidade, e a quantidade de Ingrediente 3 e 4 são de 6.195 kg e 1.156 kg, aproximadamente. Consultando os registos do ROSA, onde se fazem medições da Característica 4 e 5 para o Ingrediente 1, é possível desenvolver o presente cálculo, utilizando por exemplo,  $MV_{Ing.1} = 72.3 \text{ kg/m}^3$  e  $H_{Ing.1} = 9 \%$ .

Então a  $m_{Ing.2}$  adicionada é dada por

$$m_{Ing.2} = \frac{14 - 9}{100} \times 41.3 = 2.07 \text{ kg} \quad (4.9)$$

Os volumes de cada elemento da mistura calculam-se facilmente através das respetivas MV apresentadas na Tabela 3.4, pelo que se chega à seguinte  $MV_{mistura}$ ,

$$MV_{mistura} = \frac{41.3 + 2.07 + 6.195 + 1.156}{0.571 + 0.002 + 0.006 + 0.001} = 87.38 \text{ kg/m}^3 \quad (4.10)$$

Finalmente, a altura do armazém ( $h$ ) é dada por,

$$h = \frac{7.0}{\left(\frac{26}{2}\right)^2 \times \pi \times 87.38 \times 10^{-6}} = 150.95 \text{ mm} \quad (4.11)$$

e a taxa e compressão ( $TC$ ) dada por,

$$TC = \frac{150.95}{37} \simeq 4.1 \quad (4.12)$$

Com base nos valores da Tabela D.4 foi então possível construir o histograma da Figura 4.10. O valor mais frequente é 4.0, verificando-se então, que este será o valor ótimo para a taxa de compressão, de forma a cumprir as especificações de um corpo de rolha aglomerada e evitar o desgaste excessivo do equipamento.

#### 4.3.4 Estudo de repetibilidade

Outro aspeto que foi apontado como uma potencial causa do problema, foi a fiabilidade das medições efetuadas pelo equipamento de medição utilizado (MedCork). Como referido anteriormente (3.3.3) são controladas 5 características da qualidade: característica 1, característica 2, característica 3, característica 4, característica 5,. Uma vez que a característica 3 apenas depende da relação entre as características 1,2 e 3, e o higrómetro instalado no MedCork não ter capacidade de fazer leituras acima de 11 %, decidiu-se, então, estudar apenas três características: característica 1, característica 2 e característica 3. Para tal, efetuou-se um estudo de repetibilidade, retirando 20 corpos e executando 6 medições para cada característica. Visto o MedCork ser um equipamento de medição autónomo, não



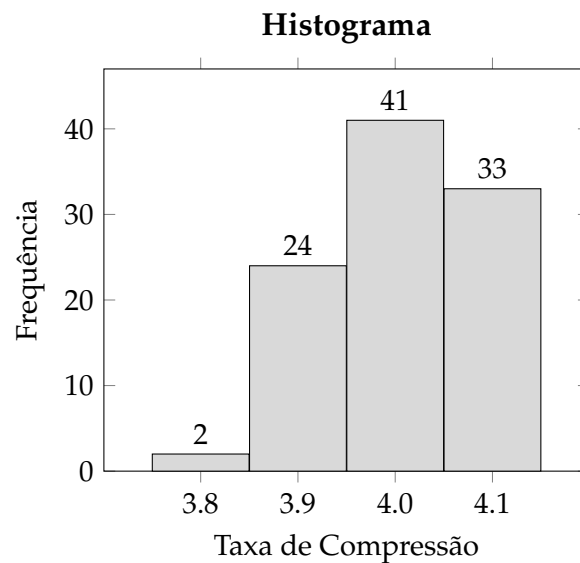


Figura 4.10: Histograma do estudo da taxa de compressão

houve necessidade de fazer um estudo de reprodutibilidade, pois o operador não tem influência no processo de medição.

Assim, construíram-se as cartas  $\bar{X}$  e  $R$  apresentadas no Anexo D.1. Como se confirma para todas as características, mais de 30 % dos valores na carta  $\bar{X}$  encontram-se fora dos limites de controle, enquanto por sua vez, os valores da carta  $R$  encontram-se todos dentro dos limites de controle.

Deste modo, conclui-se que as medições efetuadas pelo equipamento de medição são precisas e pode-se confiar nas suas leituras para posteriores tomadas de decisão acerca do processo.

## 4.4 Improve

A fase que se segue, o *Improve* (Figura 4.11) tem como principal objetivo a aplicação de ações de melhorias no processo com base no que foi estudado na fase *Analyze*. Com base nessas ações é esperado a redução, ou mesmo a eliminação, das causas dos corpos curtos, aumentando assim, o nível sigma. Na Tabela 4.14 é possível ver as ferramentas utilizadas nesta fase e qual o seu objetivo.

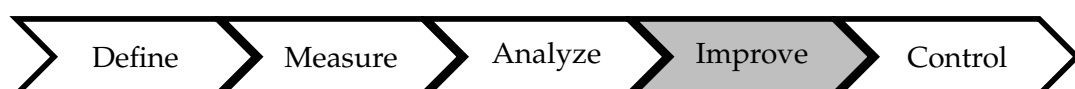


Figura 4.11: Fase *Improve* do ciclo DMAIC

Tabela 4.14: Ferramentas utilizadas na fase *Improve*

<i>Improve</i>	
Objetivo	Ferramenta utilizada
Avaliação do parâmetro Tandem	Teste de Hipótese - Diferença de duas médias
Estudo dos melhores fatores para os parâmetros controláveis	Métodos de Taguchi
Estudo sobre a melhor relação Ing. 2 vs Ing. 3	Desenho de Experiências
Discussão de quais as potenciais soluções do problema	<i>Brainstorming</i>
Hierarquização das ações de melhoria	Matriz de Prioridades
Análise da efetividade da ação de melhoria escolhida	Teste piloto

#### 4.4.1 Estudo do parâmetro *tandem*

Uma das variáveis controláveis do Equipamento é o *tandem*, e até então havia um desconhecimento da real função deste parâmetro. Com base no conhecimento do operador responsável pelo Equipamento soube-se que o *tandem* funcionava como um reforço da prensagem no molde, i.e., o pistão superior descia ligeiramente mais abaixo, de forma a que a mistura seja melhor comprimida dentro do molde.

Conforme o apresentado na Figura 4.8 uma das causas potenciais do problema em estudo seria o fecho do molde, ou seja, havia a suspeita que aquando do fecho do molde, os grãos de cortiça à superfície eram arrastados pelo atrito entre o molde e os grãos de cortiça (ver Figura 3.5).

Decidiu-se então analisar qual o efeito prático deste parâmetro. Para tal retiraram-se 50 corpos do Equipamento a funcionar com *tandem* e sem *tandem*. A característica em estudo seria a *flecha* ( $flexa = LM - lm$ ), pelo que todos os corpos foram medidos com recurso a um paquímetro do lado maior ( $LM$ ) e do lado menor ( $lm$ ).

Com base nos dados apresentados na Tabela E.1, chegou-se aos parâmetros da amostra presentes na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Parâmetros das amostras para o ensaio *tandem*

	Parâmetros ( <i>mm</i> )	
	$\mu$	$S^2$
Sem <i>tandem</i>	1.70	0.270
Com <i>tandem</i>	0.53	0.068

Realizada a verificação da normalidade (ver Anexo E.1.2), realizou-se um Teste de Hipótese para a diferença de duas médias (ver 2.2.7.4.1 e 2.2.7.4.2), para testar se as médias das amostras seriam ou não significativamente diferentes. Testando, previamente, as variâncias das amostras chegou-se ao seguinte valor de  $F_0$ ,

$$F_0 = \frac{0.270}{0.068} = 3.971 \quad (4.13)$$

como  $F_{(0.05/2;49,49)} = 1.76$  e  $F_{((1-0.05/2);49,49)} = 0.57$  rejeitamos a Hipótese Nula, pois  $F_0$  encontra-se na zona de rejeição como apresentado na Figura 4.12.

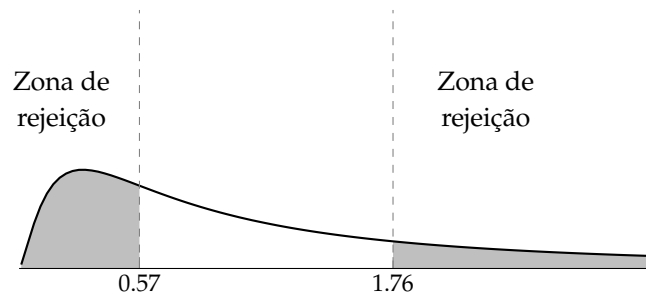


Figura 4.12: Distribuição de Fisher com áreas de rejeição

Assim, existindo evidências estatísticas que as variâncias de ambas as amostras são significativamente diferentes, a estatística de teste para a diferença de médias é dado pela Equação 2.17,

$$t_0 = \frac{(1.70 - 0.53) - 0}{\sqrt{\frac{0.270}{50} + \frac{0.068}{50}}} = 14.23 \quad (4.14)$$

calculando o número de graus de liberdade dado pela Equação 2.18, vem que  $\nu = 73$ , pelo que  $t_{critico} = t_{0.025;73} = 1.99$ . Por conseguinte, como  $|t_0| > t_{critico}$  rejeita-se a Hipótese Nula, o que indica que existem evidências estatísticas que as médias das amostras são significativamente diferentes.

Como é possível verificar, o parâmetro *tandem* reduz drasticamente a flecha e consequentemente os topos enviesados. Deste modo, visto a melhoria ser tão evidente a equipa de projeto decidiu implementar o parâmetro *tandem* com efeitos imediatos, uma vez que topos enviesados provocavam problemas na fase de Topejamento (Figura 3.7(b)).

#### 4.4.2 Métodos de Taguchi

Outro dos problemas apontados na fase *Analyze* foi o desconhecimento de qual a melhor parametrização para as variáveis controláveis do processo. Nesse sentido, a equipa Seis Sigma decidiu efetuar um desenho de experiências com base nos métodos de Taguchi para verificar quais os melhores níveis para os parâmetros em estudo.

Estudaram-se três fatores com três níveis cada, conforme apresentado na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Método de Taguchi: Fatores e respetivos níveis

Fatores	Níveis			Unidades
	1	2	3	
Fator 1	115	120	125	°C
Fator 2	45	50	55	°C
Fator 3	0.1	0.2	0.3	seg

Para o planejamento das experiências recorreu-se à matriz  $L_9$  que permite estudar até quatro fatores. Como se estudou apenas três fatores, utiliza-se a quarta coluna como uma primeira estimativa do erro.

Cada experiência foi replicada três vezes ( $j = 3$ ) e a *resposta* em estudo seria o valor da característica da qualidade: característica 1. Na Tabela 4.17 são apresentados os valores das respostas medidos para cada experiência.

Tabela 4.17: Valores das respostas para o comprimento

Exp <sup>a</sup> .	Fator				Resposta (mm)		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Erro	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	115	45	0.1	1	42.22	42.30	42.64
2	115	50	0.2	2	43.16	42.89	42.96
3	115	55	0.3	3	43.65	41.75	41.56
4	120	45	0.2	3	42.75	42.67	42.59
5	120	50	0.3	1	43.62	42.51	42.92
6	120	55	0.1	2	43.61	42.49	43.04
7	125	45	0.3	2	42.67	43.39	42.93
8	125	50	0.1	3	43.21	41.42	42.45
9	125	55	0.2	1	44.14	42.49	41.94

Procedendo-se ao tratamento dos dados para resposta média e pelo índice sinal-ruído, conforme apresentado no Anexo E.2, chegou-se às seguintes ANOVA, expostas nas Tabelas 4.18 e 4.19.

Tabela 4.18: Tabela ANOVA para tratamento pela média

Fonte de Variação	SS	g.l	MS	$F_0$	$F_{critico}$
Forno Quente	0.526	2	0.263	0.525	3.493
Forno Frio	0.053	2	0.026	0.053	
Pausa Gaveta	0.295	2	0.147	0.294	
Erro	10.011	20	0.501		
Total	10.884	26			

Tabela 4.19: Tabela ANOVA para tratamento pelo índice sinal-ruído

Fonte de Variação	SS	g.l	MS	$F_0$	$F_{critico}$
Forno Quente	106.985	2	53.493	3.025	19.000
Forno Frio	277.268	2	138.634	7.840	
Pausa Gaveta	114.228	2	57.114	3.230	
Erro	35.368	2	17.684		
Total	533.850	8			

Como se verifica, nenhum dos fatores é significativo, pois tanto para a resposta média como para o índice sinal-ruído o  $F_0 < F_{critico}$  pelo que, para os níveis dos fatores que a equipa Seis Sigma decidiu estudar é indiferente o funcionamento com qualquer um deles.

#### 4.4.3 Relação Ing. 3 vs Ing. 2: DOE um fator a vários níveis

Através do estudo desenvolvido por Moreira et al. (2015), onde os autores estabelecem uma relação entre a velocidade da reação e o teor de humidade presente numa mistura, foi possível à equipa Seis Sigma perceber que quanto maior for teor de humidade maior a velocidade da reação do Ing. 3 e Ing. 2.

Sendo complicado estudar esta relação no processo, pois tal poderia comprometer os níveis de produção e qualidade, decidiu-se executar o estudo em laboratório. Para tal, utilizaram-se formas metálicas de igual volume, onde foram colocadas diferentes concentrações de Ing. 3 e Ing. 2.

Como visto em 4.3.3, o Equipamento faz o acerto da característica 5 da mistura para 14 % com base no valor da característica 5 do ingrediente 1, i.e., se o ingrediente 1 de entrada tiver uma característica 5 de 7 % o Equipamento insere cerca de 2.8 kg de ingrediente 2, caso o ingrediente 1 entre com 13 % de característica 5 o Equipamento apenas insere 0.4 kg. De forma às experiências serem exequíveis em laboratório foi necessário reduzir as quantidades de ingrediente 2 e ingrediente 3. Assim, sabendo que por mistura o Equipamento coloca cerca de 6 kg de ingrediente 3, achou-se uma proporção entre a quantidade de ingrediente 2 e 3 para cada nível que se pretendia estudar (Tabela 4.20). Sabendo a proporção para cada nível reproduziu-se essa relação para apenas 20 g.

Tabela 4.20: Níveis para a reprodução das experiências em laboratório

Nível	Característica 5 do Ing. 1 (%)	Quantidade de Ing. 2 (kg)	Proporção	Quantidades Experiência	
				Ing. 3 (g)	Ing. 2 (g)
1	7	2.8	0.47	20	9.3
2	9	2.0	0.33	20	6.7
3	11	1.2	0.20	20	4.0
4	13	0.4	0.07	20	1.3

Para reproduzir, de uma forma aproximada as condições do processo, a mistura foi colocada numa estufa a 125 °C durante 15 minutos e posteriormente foi colocada noutra estufa a 45 °C durante 5 minutos. A resposta que se pretendia medir era a quantidade de água que seria necessário adicionar para perfazer o volume total da forma (Figura 4.13), sabendo que maiores expansões conduziam a menores quantidades adicionadas que é o pretendido.

Realizadas as experiências chegou-se aos seguintes valores de resposta apresentados na Tabela 4.21.

Após a verificação dos pressupostos da análise da variância, apresentado no Anexo E.3.2, chegou-se à seguinte tabela ANOVA (Tabela 4.22).

Sendo  $F_{critico} = F_{5\%;3;12} = 3.490$  rejeita-se a hipótese nula pois  $F_0 > F_{critico}$ , o que indica que existem diferenças significativas entre os vários níveis em estudo no que respeita ao volume de expansão. Contudo, verifica-se que menores quantidades de ingrediente

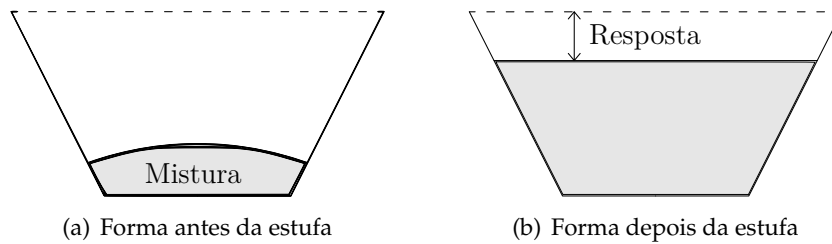


Figura 4.13: Esquema da metodologia da experiência

Tabela 4.21: Valores da resposta

Experiência	Nível (g)	Resposta (g)			
		$y_{i1}$	$y_{i2}$	$y_{i3}$	$y_{i4}$
1	9.3	75.4	75.7	74.4	76.2
2	6.7	65.8	67.1	68.3	69.1
3	4.0	54.6	56.5	53.1	55.2
4	1.3	50.4	51.2	50.8	52.7

Tabela 4.22: Tabela ANOVA do tratamento dos dados

Fonte de Variação	SS	$g.l$	MS	$F_0$
Entre Tratamentos	1508.57	3	502.86	355.95
Erro (interior)	16.95	12	1.41	
Total	1525.52	15		

2 adicionada levam, efetivamente, a maiores expansões pois a quantidade de água para perfazer o volume das formas é menor.

#### 4.4.3.1 Teste da Menor Diferença Significativa

Após se verificar que existiam diferenças significativas entre os níveis em estudo, foi necessário saber quais os níveis que diferiam entre si. Deste modo, utilizou-se o teste da Menor Diferença Significativa para proceder a esse estudo.

Tabela 4.23: Dados para o teste da menor diferença significativa

Variáveis	Valores
$\alpha$	5%
$(N - a)$	12
$t_{(\alpha/2);(N-a)}$	2.179
$n$	4
$MS_{erro}$	1.41

Com base nos valores apresentados na Tabela 4.23 chegou-se ao seguinte valor de  $LSD$ ,

$$LSD = 2.179 \times \sqrt{\frac{2 \times 1.41}{4}} = 1.83$$

Procedeu-se à comparação dos pares em estudo, sabendo que quando o valor absoluto da diferença entre as médias dos dois níveis é superior ao *LSD*, existem diferenças significativas entre eles.

Tabela 4.24: Comparação dos pares combinados entre níveis

Nível	1	2	3	4
1	-	7.85	20.58	24.15
2		-	12.73	16.30
3			-	3.58
4				-

Como se verifica na Tabela 4.24 todos os pares diferem entre si, pelo que existem diferenças entre todos os níveis em estudo.

#### 4.4.4 Brainstorming sobre as potenciais soluções

Após o estudo desenvolvido e várias sessões de *brainstorming* com elementos da equipa e sessões de esclarecimento com especialistas no processo de moldação, foi possível chegar a um conjunto de potenciais soluções para a resolução do problema.

Na Tabela 4.25 é possível ver as soluções apresentadas e a sua respetiva justificação.

Tabela 4.25: Identificação das potenciais soluções

Solução	Ação de Melhoria	Justificação
$S_1$	Alterar a taxa de compressão	Através do estudo efetuado à taxa de compressão, foi possível concluir que a taxa ideal de funcionamento seria 4.0.
$S_2$	Aumentar o ingrediente 4 na mistura	Em reunião com um especialista surgiu a hipótese de aumentar o ingrediente 4 pois o mesmo tem uma função lubrificante de forma a reduzir o atrito com o molde.
$S_3$	Restringir a quantidade de ingrediente 2 adicionado	Pelo estudo desenvolvido em 4.4.3 concluiu-se que maiores quantidades de ingrediente 2 produzem menores expansões, deste modo estabelecer um limite máximo de ingrediente 2 adicionado à mistura é uma potencial solução.

#### 4.4.5 Hierarquização das potenciais soluções

Uma vez definidas as potenciais soluções do problema foi necessário escolher qual seria implementada, visto ser inexequível a implementação de todas as propostas de melhoria.

Para auxiliar a tomada de decisão, foi necessário recorrer a uma ferramenta que permitisse chegar à melhor solução com base em critérios definidos pela equipa Seis Sigma. Nesse sentido, escolheu-se a Matriz de Prioridades pela sua formula expedita e simples de cálculo. Os critérios de decisão e as ponderações utilizadas são apresentadas nas Tabelas 4.26 4.27.

Tabela 4.26: Lista de critérios de avaliação

	Crítérios de avaliação
A	Minimização de custo de implementação
B	Rapidez de implementação
C	Impacto no processo

Tabela 4.27: Ponderação dos critérios definidos pela equipa

	Ponderação dos critérios
1	A mesma importância
5	Mais importante que a alternativa
10	Muito mais importante que a alternativa
1/5	Menos importante que a alternativa
1/10	Muito menos importante que a alternativa

Escolhidos os critérios e as ponderações foi possível construir a seguinte matriz de prioridade de critérios,

Tabela 4.28: Matriz de prioridade dos critérios

	$C_A$	$C_B$	$C_C$	Total	Ponderação (%)
$C_A$	-	0.2	0.2	0.4	0.026
$C_B$	5	-	0.2	5.2	0.333
$C_C$	5	5	-	10	0.641
Total	10	5.2	0.4	15.6	1.000

Tabela 4.29: Matriz de prioridades das soluções para o critério A

	$S_A$	$S_B$	$S_C$	Total	Ponderação (%)
$S_A$	-	0.2	0.2	0.4	0.020
$S_B$	5	-	0.1	5.1	0.249
$S_C$	5	10	-	15	0.732
Total	10	10.2	0.3	20.5	1.000

Tabela 4.30: Matriz de prioridades das soluções para o critério B

	$S_A$	$S_B$	$S_C$	Total	Ponderação (%)
$S_A$	-	0.2	0.2	0.4	0.032
$S_B$	5	-	1	6	0.484
$S_C$	5	1	-	6	0.484
Total	10	1.2	1.2	12.4	1.000



Tabela 4.31: Matriz de prioridades das soluções para o critério C

	$S_A$	$S_B$	$S_C$	Total	Ponderação (%)
$S_A$	-	0.2	0.	0.3	0.017
$S_B$	5	-	1	6	0.347
$S_C$	10	1	-	11	0.636
Total	15	1.2	1.1	17.3	1.000

Finalmente, chegou-se à seguinte matriz de prioridades onde se representam os respectivos pesos de cada solução para cada critério e a importância relativa de cada solução.

Tabela 4.32: Matriz de prioridade das soluções potenciais vs critérios de seleção

	$C_A$	$C_B$	$C_C$	Importância (%)	Prioridade
$S_1$	0.0005	0.0108	0.011	0.0224	3º
$S_2$	0.0064	0.1613	0.2223	0.3900	2º
$S_3$	0.0188	0.1613	0.4076	0.5876	1º

A título de exemplo, apresenta-se na Equação 4.15, a formula de calculo da importância  $S_1$ ,

$$I_{S_1} = 0.020 \times 0.026 + 0.032 \times 0.333 + 0.017 \times 0.641 = 0.0224 \quad (4.15)$$

Como se verifica pela Tabela 4.32 a solução prioritária é  $S_3$  pois é a que apresenta maior percentagem de importância, 58.76 %.

#### 4.4.6 Teste piloto a nível operacional

Escolhida a solução ideal, foi necessário testá-la a nível operacional para perceber se surtiria efeito. Em 4.4.3 concluiu-se que menores quantidades de água adicionada produziam maiores expansões. Uma vez que o acerto da característica 5 do ingrediente 1 é feito automaticamente, foi necessário encontrar uma solução de compromisso que permitisse contornar essa situação.

Assim, decidiu-se que se iria fazer o acerto da característica 5 apenas para 11%, enquanto em termos absolutos não se adicionaria mais do que 1.2 kg de ingrediente 2. Fazendo o raciocínio inverso foi necessário perceber qual o limite mínimo da característica 5 do ingrediente 1 à entrada da moldação para que o Equipamento não adicionasse mais do que os 1.2 kg de ingrediente 2, assim formulou-se a seguinte equação 4.16,

$$\frac{11 - x}{100} \times 41.3 = 1.2 \quad (4.16)$$

Encontrado o limite mínimo ( $x = 8\%$ ) foi transmitido a todos os operadores que, durante o teste piloto, não se introduziria valores de característica 5 do ingrediente 1 menores que 8%, evitando assim que o Equipamento inserisse mais do que 1.2 kg de ingrediente 2 na mistura.

Realizado o teste piloto chegou-se às seguintes amostras apresentadas na Tabela 4.33.

Tabela 4.33: Amostras do teste piloto

Amostra	Quantidade Observada ( $n$ )	Defeituosos ( $d$ )
1	58773	275
2	66903	284
3	62025	1469
4	58778	800
5	71117	1684
6	66694	34
7	88117	89
8	63817	379
9	62401	831
10	59480	2112
11	61323	537
12	63349	1221
13	67236	600
14	69302	217
15	66877	109
16	54901	61
17	68176	390
18	65599	985
19	65854	2562
20	68736	313

Analogamente ao que foi efetuado para encontrar o nível sigma do processo em 4.2.2, recorreu-se, mais uma vez, à carta Laney  $p'$  para chegar à proporção média de defeituosos. Como se verifica na Figura 4.14 não existe qualquer ponto fora de controlo estatístico o que indica uma nova proporção média de defeituosos de  $\bar{p} = 0.011$ .

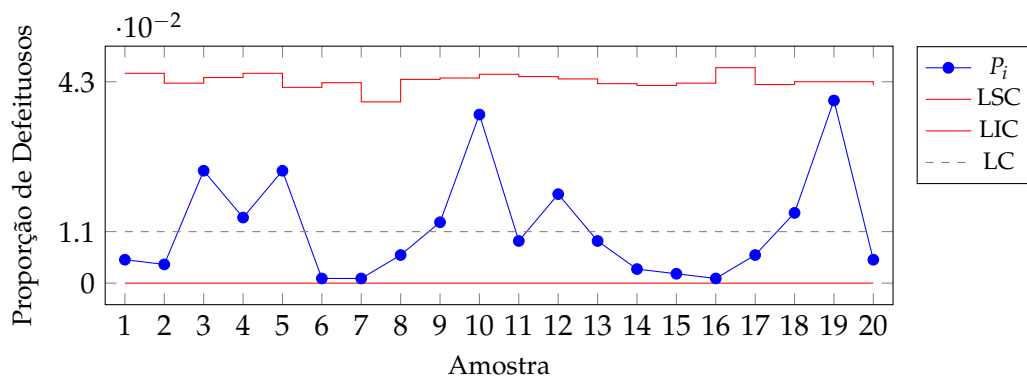


Figura 4.14: Carta Laney  $p'$  do teste piloto

#### 4.4.6.1 Cálculo do novo nível sigma

Calculada a nova proporção média de defeituosos, estava-se então em condições de converter esse valor em *DPMO* e, novamente, através da Tabela A.1 chegar ao novo nível sigma.

$$DPMO = \bar{p} \times 10^6 = 0.011 \times 10^6 = 11000 \quad (4.17)$$

Chegou-se então ao seguinte novo nível sigma,

Tabela 4.34: Novo nível sigma

DPMO	Nível Sigma
11000	3.8

Como se verifica na Tabela 4.34, o nível sigma aumentou durante o teste piloto, contudo o resultado obtido ficou ligeiramente aquém da meta proposta no *Project Charter*, no entanto os resultados foram bastante satisfatórios pelo que a equipa Seis Sigma decidiu que se iria implementar a ação de melhoria em larga escala passando assim à fase *Control* do ciclo DMAIC.

## 4.5 Control

A última fase do ciclo DMAIC é a fase *Control* (Figura 4.15), e tem como principal foco a monitorização do processo. Nesta fase a equipa Seis Sigma tem a função de encontrar as ferramentas adequadas que possibilitem o controlo do processo e, após uma fase de maturação, transferir a responsabilidade desse controlo à própria organização.

No entanto, por escassez de tempo para a realização do estudo, não foi possível implementar nenhuma das atividades definidas nesta fase, porém deixam-se algumas sugestões (Tabela 4.35) de ferramentas a adotar, para que se sustente, a longo prazo, os ganhos obtidos.

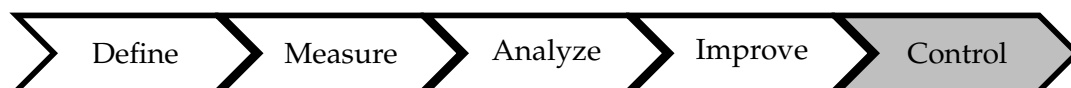


Figura 4.15: Fase *Control* do ciclo DMAIC

#### 4.5.1 Avaliação das ações tomadas em larga escala

Como se verificou no teste piloto realizado, os resultados alcançados ficaram ligeiramente aquém da meta proposta à partida do projeto. Apesar da equipa Seis Sigma ter considerado os resultados suficientemente satisfatórios para passar à fase *Control* é necessário perceber qual o impacto da ação de melhoria tomada em larga escala.

Tabela 4.35: Ferramentas sugeridas para a fase *Control*

<i>Control</i>	
Objetivo	Ferramentas sugeridas
Avaliar o alcance das melhorias alcançadas em larga escala	Carta Laney p'; Métricas do Seis Sigma
Transmissão dos conhecimentos adquiridos a todos os elementos da organização	Reuniões; Manuais; Palestras
Definir medidas a tomar para a sustentabilidade dos ganhos alcançados	Plano de recolha de dados; Cartas de controlo; Índices de capacidade; Métricas do Seis Sigma

Deste modo, sugere-se a continuação da construção da carta Laney p', aumentando o número de amostras pelas quais se calculou a proporção média de defeituosos, assim perceber-se-á se se situa realmente acima de 1% ou se por sua vez com um maior número de amostras baixe e alcance a meta pretendida.

Caso a meta não tenha sido alcançada aconselha-se voltar à fase *Measure* e realizar novo ciclo de melhoria, por outro lado, caso a meta tenha sido alcançada é necessário recalcular o novo nível sigma do processo para que se tome como referência de comparação para medições futuras. Sugere-se então, a utilização das métricas do Seis Sigma baseadas em DPMO.

#### 4.5.2 Transmissão dos conhecimentos adquiridos

Alcançada a meta proposta é necessário que a equipa Seis Sigma encontre mecanismos que facilitem a transferência da responsabilidade do processo para a organização. Para que as alterações e melhorias alcançadas cheguem a todas os elementos envolvidos, é necessário encontrar uma forma de passar o conhecimento adquirido de forma transversal.

Nesse sentido, sugere-se a organização de reuniões com os líderes de cada área para apresentar o trabalho desenvolvido, promovendo o diálogo e as sugestões de todas as partes. Do mesmo modo, sugere-se também a criação de manuais que possibilitem a divulgação do estudo desenvolvido a elementos que possam vir a pertencer futuramente à organização para que fiquem a par dos trabalhos já desenvolvidos e sirva de base para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

#### 4.5.3 Plano de monitorização e controlo

Por último, com o objetivo de criar um plano que facilite o controlo futuro do processo por parte da organização, a equipa Seis Sigma deve propor um plano de monitorização e controlo eficaz e completo, que vá de encontro às especificidades do problema.

Apresenta-se seguidamente as ferramentas constituintes do plano monitorização e controlo sugerido pela equipa Seis Sigma, bem como algumas sugestões para que essas ferramentas produzam resultados mais eficazes.

1. **Prudência na recolha de dados:** sendo o ambiente industrial bastante competitivo, existe a necessidade de rentabilizar ao máximo os tempos produtivos. Neste sentido, é comum na UI-Equipar haver mistura de diferentes lotes de produção para perfazer os 60 mil corpos, que é a capacidade de cada silo. Contudo, não é todo aconselhável esta prática pois pode levar a que se tirem conclusões erradas sobre uma determinada amostra, e uma vez que se perde a rastreabilidade do lote é difícil encontrar a causa para causa especial de variação.
2. **Controlo estatístico do processo:** para o controlo estatístico do processo sugere-se a continuação da carta Laney  $p'$  que demonstrou ser um método expedito no controlo da proporção de defeituosos, e evita a sobredispersão entre as amostras recolhidas.
3. **Cálculo do nível sigma periodicamente:** com o intuito de perceber a evolução do processo sugere-se que se utilizem as métricas do Seis Sigma periodicamente para avaliar o estado do mesmo. Caso o nível sigma seja menor do que o calculado à partida da fase *Control* deve voltar-se à fase *Measure* e realizar novo ciclo de melhoria.



## CONCLUSÃO

Após a revisão bibliográfica e a aplicação prática no caso de estudo, do Seis Sigma enquanto metodologia e métrica poder-se-á tirar algumas conclusões acerca da filosofia Seis Sigma para a resolução de problemas e sobre os resultados alcançados com a sua aplicação.

Devido à restrição temporal para a realização do estudo, ficaram alguns aspetos por desenvolver que seria interessante serem analisados. Nesse sentido, deixam-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros, com a finalidade de complementar o trabalho já desenvolvido e atingir melhorias ainda mais significativas.

### 5.1 Conclusões gerais

O aparecimento da filosofia Seis Sigma data de finais da década de oitenta do século passado. Desde então que na literatura se tem aprofundado o conceito e se tem descrito as múltiplas vantagens da sua utilização. Neste sentido, o desenvolvimento da presente dissertação corrobora a utilidade da aplicabilidade do Seis Sigma em toda a sua dimensão, enquanto metodologia baseada no ciclo DMAIC, suportado pelas mais variadas técnicas e ferramentas da qualidade, bem como, enquanto métrica baseada em defeitos que permite quantificar o problema em estudo o criar critérios de comparação entre o início e o final do estudo.

De facto, está comprovado que o Seis Sigma enquanto metodologia, baseada no ciclo DMAIC, produz excelentes resultados na resolução de problemas, no entanto para que os resultados alcançados sejam duradouros é necessário uma mudança cultural na organização. No entanto, a indústria corticeira é uma indústria secular, iniciada e gerida durante muitos anos por pessoas com forte conhecimento técnico. Este paradigma conduziu a que se criasse alguma aversão à mudança dentro da própria indústria pois, o conhecimento técnico passava pelas gerações sem grandes alterações. Felizmente, este paradigma tem vindo a mudar ao longo do tempo, com a renovação da gestão de topo

e uma maior abertura a projetos que aliam o conhecimento científico ao conhecimento técnico, a indústria corticeira tem vindo a melhorar os seus processos e produzir ainda melhores resultados. Espera-se que a realização deste estudo e os resultados obtidos tenham contribuído para essa mudança de paradigma e que gradualmente possa haver a mudança cultural, componente chave para o sucesso do Seis Sigma.

Efetivamente o trabalho realizado produziu uma melhoria significativa nos resultados obtidos. Através das fases do ciclo DMAIC auxiliadas pelas diversas ferramentas da qualidade utilizadas, foi possível quantificar uma melhoria de 0.5 sigma, de 3.3 medido na fase *Measure* para 3.8 medido na fase *Improve* após a implementação das ações de melhoria. Apesar da melhoria na escala sigma não parecer tão evidente, melhorar de 3.3 sigma para 3.8, foi o equivalente a reduzir a proporção de unidades defeituosas de 3.6% para cerca de 1.1%. Não obstante, o resultado obtido ficou ligeiramente aquém do preestabelecido na fase *Define*, do mesmo modo, por restrição temporal para a realização do estudo também não foi possível sustentar os resultados obtidos na fase *Control*, deixando-se apenas algumas indicações de como proceder à monitorização do processo.

O ciclo DMAIC demonstrou ser uma metodologia poderosa na sistematização da linha de raciocínio para a resolução de problemas. A ordem de execução das suas cinco fases e os objetivos pretendidos em cada uma delas seguem um raciocínio lógico que vai de encontro à solução do problema. Do mesmo modo, a flexibilidade da utilização das ferramentas da qualidade que melhor se adequam ao estudo traduz-se numa vantagem pois confere grande versatilidade na aplicação do ciclo.

No entanto, o ciclo DMAIC não é restrito, i.e., pressupõe uma continuidade ao longo do tempo, inserido-se numa forte cultura de melhoria continua. Deste modo, quando se percorrem as cinco fases e os resultados alcançam as metas desejadas, deve passar-se ao projeto seguinte, caso contrário deve voltar-se à fase *Measure* e procurar meteticulosamente as causas potenciais do problema (*Analyze*) e agir sobre essas causas (*Improve*).

O processo de moldação tem grande potencial no fabrico de rolhas técnicas aglomeradas. Tanto na eficiência do processo produtivo, reduzindo o desperdício de matéria prima e os tempos não produtivos, como nos índices de qualidade, que podem melhorar significativamente, pois é um processo mais controlado e menos suscetível a fontes de variação exteriores. Espera-se que, o conhecimento sobre o processo, adquirido com a presente dissertação, tenha sido uma mais valia para a UI-Equipar e sirva de base para projeto de melhoria futuros.

Concluindo, pelo que foi exposto no presente texto, o sucesso do Seis Sigma, não advém apenas da forma científica e metodológica como aborda os problemas, o seu sucesso a longo prazo pressupõe uma forte mudança cultural de toda a organização, uma mudança de paradigma que prime pela excelência buscando incessantemente a melhoria continua. Só assim, faz sentido falar no Seis Sigma como um sistema de gestão eficaz e duradouro. Por outro lado, a indústria corticeira está a sofrer uma grande mudança de mentalidade, que propicia maior abertura para projetos deste tipo. Nesse sentido, espera-se que o desenvolvimento deste trabalho, pioneiro na organização, seja o início da



mudança de mentalidade e se encare cada vez mais a mudança como algo positivo, que pode produzir melhorias significativas.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

No decorrer do estudo foi possível ir detetando algumas falhas no processo ou alguns problemas que propiciavam o mau funcionamento do Equipamento, que não foram possíveis estudar pela restrição temporal do estudo. Nesse sentido, apontam-se algumas sugestões para desenvolver no futuro com vista a promover o bom funcionamento do Equipamento e se possível melhorar o nível sigma obtido.

- ✓ **Revisão do controlo do processo:** verificou-se que o processo era alvo de controlo frequente. Contudo, nesse controlo raramente se detetava problemas, primeiro porque a amostragem é relativamente pequena para a produção do Equipamento, segundo porque o corpo aglomerado quando controlado à saída do processo apresenta dimensões maiores do que quando estabilizado pois existe um fenómeno de retração. Deste modo, deve rever-se o plano de controlo para que este tenha uma maior eficácia e permita detetar precocemente problemas a montante do processo produtivo.

Sugestões:

- Estudar o comportamento da curva característica de retração e com base nesse conhecimento encontrar um compromisso com os limites de especificação e consequentemente com os limites de controlo do processo.
- Aumentar a dimensão da amostra, para o estudo das características da qualidade 1,2,3,4 e 5, de forma a ter uma maior abrangência sobre o processo completo, podendo a periodicidade ser reduzida para as 4h. Contudo, o operador responsável pelo processo não deve descurar o controlo visual que permite detetar facilmente grandes variações do processo.
- apesar deste estudo se ter centrado apenas num tipo de produto, o Equipamento produz vários tipos dependendo do ingrediente 1 utilizado, neste sentido sugere-se a utilização das cartas  $Z$  e  $W$ , por permitirem controlar os diferentes produtos na mesma carta, e ao mesmo tempo serem de fácil compreensão para o operador identificar causas especiais de variação. Por outro lado também permitem calcular a capacidade do processo a cada amostra através dos seus índices  $Z_i$  e  $Z_s$ . Se por outro lado a organização preferir controlar todas as características apenas numa carta pode optar por cartas de controlo estatístico multivariado, tendo a consciência da sua maior dificuldade aquando da interpretação de qual das características em estudo provocou a causa especial de variação.

- ✓ **Criação de planos de manutenção e limpeza:** sendo um equipamento industrial com uma utilização intensiva, o Equipamento está sujeito ao desgaste natural proveniente do seu funcionamento. Este desgaste encontra-se muitas vezes ligado às causas dos problemas. Assim, criar uma rotina de inspeção que permita realizar uma manutenção preventiva em vez de corretiva, ganha tremenda importância pois aumentaria os tempos de bom funcionamento e consequentemente a produção.

Sugestões:

- Identificação dos pontos críticos de desgaste.
- Criação de uma rotina de inspeção, operada periodicamente, com os pontos críticos a serem inspecionados e quais as suas características normais.

- ✓ **Criação de equipas de trabalho Seis Sigma:** pelos inúmeros benefícios descritos pelo uso do Seis Sigma, é importante prosseguir esta dinâmica na organização para dar continuidade ao trabalho desenvolvido e mitigar as causas potenciais de variação do processo.

Sugestões:

- Criação de equipas multidisciplinares que integrando as diversas ferramentas descritas procurem resolver as causas de variação do processo.
- Quando possível, seria importante a integração de peritos externos à organização que pudessem auxiliar com o seu conhecimento científico.

- ✓ **Divulgação futura do estudo realizado:** é de extrema importância a criação de um mecanismo que agregue toda a informação dos estudos já efetuados na organização. Para que, o conhecimento adquirido nesta dissertação, sirva como base e auxílio nos potenciais trabalhos futuros.

Sugestões:

- Criação de uma plataforma de conhecimento, onde se agregue a informação obtida com os estudos já realizados na organização. Para que possa ser consultada por futuros colaboradores e auxilie na familiarização do processo e da organização em si.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, L. (1955). *Quality and Competition*. Columbia University Press.
- Andersen, B. (2007). *Business Process Improvement Toolbox*. ASQ Quality Press.
- Antony, J. (2006). «Six sigma for service processes». *Business Process Management Journal* 12.2, pp. 234–248.
- (2007). «Is six sigma a management fad or fact?». *Assembly Automation* 27.1, pp. 17–19.
- Antony, J. & Banuelas, R. (2001). «Strategy for survival». *Manufacturing Engineer* 80.3, pp. 119–121.
- Antony, J., Escamilla, J. L. & Caine, P. (2003). «Lean Sigma». *Manufacturing Engineer* 82.4, pp. 40–42.
- APCOR (2015a). «Crescer em valor é a estratégia a seguir». *Anuário de cortiça - Boletim Estatístico*.
- (2015b). «Montado e produção de cortiça». *Estudo de Caracterização Setorial -Estatísticas e Prospetiva*.
- (2016). «Notícias APCOR». Em: 82, pp. 3–4.
- ASQ (2016a). *History of Quality*. URL: <http://asq.org/learn-about-quality/history-of-quality/overview/overview.html> (acedido em 15/04/2016).
- (2016b). *Six Sigma Belts, Executives and Champions – What Does It All Mean?* URL: <http://asq.org/learn-about-quality/six-sigma/overview/belts-executives-champions.html> (acedido em 15/07/2016).
- (2016c). *Who We Are - History*. URL: <http://asq.org/about-asq/who-we-are/history.html> (acedido em 21/05/2016).
- Basu, R. (2004). *Implementing Quality: A Practical Guide to Tools and Techniques : Enabling the Power of Operational Excellence*. Thomson Learning, p. 170. ISBN: 9781844800575.
- Benedetto, A. R. (2003). «Adapting manufacturing-based Six Sigma methodology to the service environment of a radiology film library». *Journal of healthcare management / American College of Healthcare Executives* 48, pp. 263–280.
- Blakeslee Jr., J. A. (1999). «Implementing the Six Sigma solution». *Quality Progress* 32, p. 78.
- Buzzell, R. D. & Gale, B. T. (1987). *The PIMPS Principles: Linking Strategy to Performance*. First. The Free Press, p. 111. ISBN: 0-02-904430-8.
- Castro, P. M. (2001). «Método de Taguchi: Controlo de Qualidade com Recurso Não-Convencional ao Desenho Estatístico de Experiências (DOE)». *Revista de Estatística - 1º Quadrimestre de 2001*, pp. 53 –72.

- Chakrabarty, A. & Tan, K. C. (2007). «The current state of six sigma application in services». *Managing Service Quality* 17.2, pp. 194–208.
- Condi, T., Kondo, Y. & Watson, G. (2003). *Quality into the 21st Century*. First. ASQ Quality Press. ISBN: 0-87389-602-5.
- Corticeira Amorim (2015). «Relatório e Contas 2015 - Corticeira Amorim, S.G.P.S.,S.A.» Em:  
 — (2016). *Fluxo de produção*. URL: <http://www.amorimcork.com/pt/natural-cork/raw-material-and-production-process/> (acedido em 21/05/2016).
- Dahlgaard, J., Kristensen, K. & Kanji, G. (2007). *Fundamentals of Total Quality Management*. First. Taylor e Francis, p. 7. ISBN: 0-203-93002-9.
- Dale, B. G. (2003). *Managing Quality*. Fourth. Blackwell, p. 21. ISBN: 0-631-23614-7.
- Deming, E. W. (1986). *Out of the Crisis*. MIT-Center for Advanced Engineering Study.
- Dhillon, B. s. (1999). *Design Reliability - Fundamentals and Applications*. First. CRC Press LLC, p. 1. ISBN: 0-8493-1465-8.
- Dinis, M. F.D. S. (2014). «Caso de Estudo: UI-Equipar. Procedimento de Amostragem de Aparas para Quantificação de 2,4,6-Tricloroanisol». Tese de mestrado. MIEQB: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.
- Dusharme, D. (2006). «Six Sigma Survey: Big Successy What About Other 98 Percent?» *Quality Digest Magazine*.
- Eckhouse, J. (2003). «In Pursuit Of Perfection. Bechtel Brief's».
- Egitron (2008). *Sistema Automático de Rolhas*. URL: <http://www.egitron.pt/client/skins/portuguese/produtos.asp?produto=377> (acedido em 21/07/2016).
- Emil, C., Liviu, I. & Ioan, M. (2010). «Six Sigma: A metric, a methodology and a management system». *The Journal of the Faculty of Economics - Economic*.
- Feigenbaun, A. (1983). *Total Quality Control*. Third. McGraw-Hill.
- Fox, G. & Martz, E. (2016). *On the Charts: A Conversation with David Laney*. URL: <http://www.minitab.com/pt-br/Published-Articles/On-the-Charts--A-Conversation-with-David-Laney/> (acedido em 25/03/2016).
- Franz, L. & Caten, C. (2003). «Uma discussão quanto à relação entre os métodos DMAIC e PDCA». Em: *III Semana de Engenharia de Produção e Transportes*.
- Garvin, D. A. (1988). *Managing Quality*. First. The Free Press, pp. 41, 46. ISBN: 0-02-911389-6.
- Gaspar, A. R. V. (2015). «Aplicação do Seis Sigma na Avaliação da Inexatidão dos Resultados Laboratoriais do Parâmetro Cortisol Sérico». Tese de mestrado. MIEGI: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.
- Gomes, A. R. V. (2015). «Caracterização do Fenómeno de Absorção de Líquidos em Rolhas Técnicas de Cortiça». Tese de mestrado. MIEQB: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.
- Gygi, C., DeCarlo, N. & Williams, B. (2005). *Six Sigma for Dummies*. First. Wiley Publishing, Inc. ISBN: 0-7645-6798-5.

- Hahn, G. J., Hill, W. J., Hoerl, R. W. & Zinkgraf, S. A. (1999). «The Impact of Six Sigma Improvement - A Glimpse Into de Future Of Statistics». *The American Statistician* 53, pp. 218–215.
- Harry, M. & Schroeder, R. (2005). *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*. Second. Currency. ISBN: 9780385494380.
- iSixSigma (2016). *History of the Six Sigma Black Belt Naming Convention*. URL: <https://www.isixsigma.com/new-to-six-sigma/history/history-six-sigma-black-belt-naming-convention/> (acedido em 10/06/2016).
- Joglekar, A. M. (2003). *Statistical Methods for Six Sigma*. John Wiley e Sons. ISBN: 0-471-20342-4.
- Johnson, A. & Swisher, B. (2003). «How six sigma improve R&D». *Research Technology Management* 46.2, pp. 12–15.
- Juran, J. (1954). *Quality Control Handbook*. Fifth. Mc-Graw-Hill, p. 2.1.
- Kaye, M. M. & Dyason, M. D. (1995). «The fifth era». *The TQM Magazine* 7.1, pp. 33–37.
- Kubiak, T. & Benbow, D. (2009). *The Certified Six Sigma Black Belt Handbook*. ASQ Quality Press, pp. 17–18. ISBN: 9780873897327.
- Kumar, D., Nowicki, D., Ramírez-Márquez, J. E. & Verma, D. (2008). «On the optimal selection of process alternatives in a Six Sigma implementation». *International Journal of Production Economics* 111, pp. 456–467.
- Kwak, Y. H. & Anbari, F. T. (2006). «Benefits, obstacles and future of six sigma approach». *Technovation* 26, pp. 708–715.
- Laney, D. B. (2002). «Improved Control Charts for Attributes». *Quality Engineering* 14.4, pp. 531–537.
- Liderman, K., Schroeder, R. G., Zaheer, S. & Choo, A. S. (2003). «Six Sigma: A goal-theoretic perspective». *Journal of Operations Management* 21, pp. 192–203.
- Lunau, S., John, A., Meran, R., Roempage, O. & Staudter, C. (2008). *Six Sigma +Lean Toolset*. First. Springer. ISBN: 978-3-540-32349-5.
- Marques, P. A. & Requeijo, J. G. (2009). «SIPOC: A Six Sigma Tool Helping on ISO 9000 Quality Management Systems». Em: *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, pp. 1229–1238.
- McCarty, T., Bremer, M., Daniels, L. & Gupta, P. (2005). *The Six Sigma Black Belt Handbook*. First. McGraw Hill, pp. 3–10. ISBN: 978-0-07-150145-3.
- Melo, R. A. (2014). «Análise da influência das variáveis do processo de furação de materiais compósitos sobre o dano através do método de Taguchi com características dinâmicas». Tese de mestrado. MIEGI: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. Sixth. Wiley, pp. 6–7.
- Montgomery, D. C. (2005). «Generation III of Six Sigma». *Quality and Reability Engineering International* 6, p. 21.
- Montgomery, D. C. & Woodall, W. H. (2008). «An Overview of Six Sigma». *International Statiscal Review*. 76.3, pp. 329–346.

- Moreira, L., Costa, V. & Neto da Silva, F. (2015). «Effect of moisture content on curing kinetics of agglomerate cork». *Materials and Design*, pp. 312–316.
- Nave, D. (2002). «How to compare six sigma, lean and the theory of constraints». *Quality Progress* 35.3, p. 73.
- Opricovic, S. & Tzeng, G.-H. (2004). «Compromise solution by {MCDM} methods: A comparative analysis of {VIKOR} and {TOPSIS}». *European Journal of Operational Research* 156.2, pp. 445–455.
- Pande, P. S., Neuman, R. P. & R.Cavanagh, R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola and Other Top Companies Are Honing Their Performance*. McGraw-Hill, p. xi. ISBN: 90-07-137667-4.
- Park, S. H. (2003). *Six Sigma for Quality Productivity Promotion*. First. Asian Productivity Organization, p. 5. ISBN: 92-833-1722-X.
- Pereira, Z. L. & Requeijo, J. G. (2012). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Second. FFCT.
- Pinto, J. (2006). *Gestão de Operações na indústria e nos serviços*. Lidel - edições técnicas lda. ISBN: 9789727577415.
- Pirsig, R. M. (1974). *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance*. First. Bantam Books, pp. 183–200, 205–215, 223–228.
- Price, F. (2003). *Handbook of Quality Management*. Third. Gower, pp. 4–6. ISBN: 0-566-08149-0.
- Pyzdek, T. (2003). *The Six Sigma Handbook*. First. McGraw-Hill, pp. 4–6. ISBN: 0-07-141596-3.
- Quality. (1989). *The Oxford Dictionary of English*. Oxford University Press.
- Raisinghanil, M. S. (2005). «Six Sigma: Concepts, tools, and applications». *Industrial Management and Data Systems* 105.4, pp. 491–505.
- Rajagopalan, R., Francis, M. & Suárez, W. (2004). «Managers at Work: Developing Novel Catalysts with Six Sigma». *Research-Technology Management* 47.1, pp. 13–16.
- Reeves, C. A. & Bednar, D. A. (1994). «Defining Quality: Alternatives and Implications». *Academy of Management Review* 19.3, pp. 419–445.
- Roberts, C. M. (2004). «Six Sigma Signals». *Credit Union Magazine* 70, p. 40.
- Rothwell, W., Hohne, C. & King, S. (2012). *Human Performance Improvement*. Taylor & Francis. ISBN: 9781136397370.
- Sanders, D. & Hild, C. (2000). «Six Sigma on Business Processes: Common Organizational Issues». *Quality Engineering* 12.4, pp. 603–610.
- Schroeder, R. G., Linderman, K., Liedtke, C. & Choo, A. S. (2008). «Six Sigma: Definition and underlying theory». *Journal of Operations Management* 26, pp. 536–554.
- Shewart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. 50th anniversary commemorative reissue. D. Van Nostrand Company, Inc.
- Silva, R. C. e (2013). «Seis Sigma na Avaliação Externa da Qualidade em Laboratórios Clínicos». Tese de mestrado. MIEGI: Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa.

- Sokovic, M., Pavletic, D. & Kern Pipan, K. (2010). «Quality Improvement Methodologies – PDCA Cycle, RADAR Matrix, DMAIC and DFSS». *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 43.1, pp. 476–483.
- Starbird, D. (2002). «Business Excellence: Six Sigma as a Management System». *ASQ's 56th Annual Quality Congress Proceedings*, pp. 47–55.
- Tennant, G. (2001). *Six Sigma: SPC and TQM in Manufacturing and Services*. First. Gower Publishing Company, p. 7. ISBN: 0-566-08374-4.
- Tuchman, B. W. (1980). «The decline of quality». *New York Times Magazine*, p. 38.
- Werkema, C. (2004). *Criando a Cultura Seis Sigma*. Third. Werkema Editora, p. 15. ISBN: 85-98582-01-8.
- Yang, K. & El-Haik, B. (2003). *Design for Six Sigma - A Roadmap for Product Development*. First. McGraw Hill, p. xi. ISBN: 0-07-143599-9.
- Yong, J. & Wilkinson, A. (2002). «The long and winding road: The evolution of quality management». *Total Quality Management* 13.1, pp. 101–121.
- ZeePedia (2016). *The Four Major Quality Eras*. URL: <http://www.zeepedia.com/read.php?history.of.quality.management.paradigms.total.quality.management.tqm&b=59&c=10> (acedido em 23/05/2016).







## TABELAS AUXILIARES

### A.1 Tabela de conversão de DPMO para a escala Sigma

Tabela A.1: Conversão de DPMO em nível sigma

Nível Sigma	DPMO	Nível Sigma	DPMO	Nível Sigma	DPMO	Nível Sigma	DPMO	Nível Sigma	DPMO
0	933193	1,2	617911	2,4	184060	3,6	17864	4,8	483,4
0,05	926471	1,25	598706	2,45	171056	3,65	15778	4,85	404,1
0,1	919243	1,3	579260	2,5	158655	3,7	13903	4,9	336,9
0,15	911492	1,35	559618	2,55	146859	3,75	12224	4,95	280,3
0,2	903200	1,4	539828	2,6	135666	3,8	10724	5	232,6
0,3	884930	1,5	500000	2,7	115070	3,9	8198	5,1	159,1
0,35	874928	1,55	480061	2,75	105650	3,95	7143	5,15	131,1
0,4	864334	1,6	460172	2,8	96800	4	6210	5,2	107,8
0,45	853141	1,65	440382	2,85	88508	4,05	5386	5,25	88,4
0,5	841345	1,7	420740	2,9	80757	4,1	4661	5,3	72,3
0,55	828944	1,75	401294	2,95	73529	4,15	4025	5,35	59,1
0,6	815940	1,8	382089	3	66807	4,2	3467	5,4	48,1
0,65	802337	1,85	363169	3,05	60571	4,25	2980	5,45	39,1
0,7	788145	1,9	344578	3,1	54799	4,3	2555	5,5	31,7
0,75	773373	1,95	326355	3,15	49471	4,35	2186	5,55	25,6
0,8	758036	2	308538	3,2	44565	4,4	1866	5,6	20,7
0,85	742154	2,05	291160	3,25	40059	4,45	1589	5,65	16,6
0,9	725747	2,1	274253	3,3	35930	4,5	1350	5,7	13,3
0,95	708840	2,15	257846	3,35	32157	4,55	1144	5,75	10,7
1	691462	2,2	241964	3,4	28717	4,6	968	5,8	8,5
1,05	673645	2,25	226627	3,45	25588	4,65	816	5,85	6,8
1,1	655422	2,3	211855	3,5	22750	4,7	687	5,9	5,4
1,15	636831	2,35	197663	3,55	20182	4,75	577	5,95	4,3
								6	3,4

## A.2 Tabela da distribuição normal reduzida

Tabela A.2: Tabela da distribuição normal reduzida

Z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,5000	0,4960	0,4920	0,4880	0,4840	0,4801	0,4761	0,4721	0,4681	0,4641
0,1	0,4602	0,4562	0,4522	0,4483	0,4443	0,4404	0,4364	0,4325	0,4286	0,4247
0,2	0,4207	0,4168	0,4129	0,4090	0,4052	0,4013	0,3974	0,3936	0,3897	0,3859
0,3	0,3821	0,3783	0,3745	0,3707	0,3669	0,3632	0,3594	0,3557	0,3520	0,3483
0,4	0,3446	0,3409	0,3372	0,3336	0,3300	0,3264	0,3228	0,3192	0,3156	0,3121
0,5	0,3085	0,3050	0,3015	0,2981	0,2946	0,2912	0,2877	0,2843	0,2810	0,2776
0,6	0,2743	0,2709	0,2676	0,2643	0,2611	0,2578	0,2546	0,2514	0,2483	0,2451
0,7	0,2420	0,2389	0,2358	0,2327	0,2296	0,2266	0,2236	0,2206	0,2177	0,2148
0,8	0,2119	0,2090	0,2061	0,2033	0,2005	0,1977	0,1949	0,1922	0,1894	0,1867
0,9	0,1841	0,1814	0,1788	0,1762	0,1736	0,1711	0,1685	0,1660	0,1635	0,1611
1,0	0,1587	0,1562	0,1539	0,1515	0,1492	0,1469	0,1446	0,1423	0,1401	0,1379
1,1	0,1357	0,1335	0,1314	0,1292	0,1271	0,1251	0,1230	0,1210	0,1190	0,1170
1,2	0,1151	0,1131	0,1112	0,1093	0,1075	0,1056	0,1038	0,1020	0,1003	0,0985
1,3	0,0968	0,0951	0,0934	0,0918	0,0901	0,0885	0,0869	0,0853	0,0838	0,0823
1,4	0,0808	0,0793	0,0778	0,0764	0,0749	0,0735	0,0721	0,0708	0,0694	0,0681
1,5	0,0668	0,0655	0,0643	0,0630	0,0618	0,0606	0,0594	0,0582	0,0571	0,0559
1,6	0,0548	0,0537	0,0526	0,0516	0,0505	0,0495	0,0485	0,0475	0,0465	0,0455
1,7	0,0446	0,0436	0,0427	0,0418	0,0409	0,0401	0,0392	0,0384	0,0375	0,0367
1,8	0,0359	0,0351	0,0344	0,0336	0,0329	0,0322	0,0314	0,0307	0,0301	0,0294
1,9	0,0287	0,0281	0,0274	0,0268	0,0262	0,0256	0,0250	0,0244	0,0239	0,0233
2,0	0,0228	0,0222	0,0217	0,0212	0,0207	0,0202	0,0197	0,0192	0,0188	0,0183
2,1	0,0179	0,0174	0,0170	0,0166	0,0162	0,0158	0,0154	0,0150	0,0146	0,0143
2,2	0,0139	0,0136	0,0132	0,0129	0,0125	0,0122	0,0119	0,0116	0,0113	0,0110
2,3	0,0107	0,0104	0,0102	0,0099	0,0096	0,0094	0,0091	0,0089	0,0087	0,0084
2,4	0,0082	0,0080	0,0078	0,0075	0,0073	0,0071	0,0069	0,0068	0,0066	0,0064
2,5	0,0062	0,0060	0,0059	0,0057	0,0055	0,0054	0,0052	0,0051	0,0049	0,0048
2,6	0,0047	0,0045	0,0044	0,0043	0,0041	0,0040	0,0039	0,0038	0,0037	0,0036
2,7	0,0035	0,0034	0,0033	0,0032	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0026
2,8	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	0,0023	0,0022	0,0021	0,0021	0,0020	0,0019
2,9	0,0019	0,0018	0,0018	0,0017	0,0016	0,0016	0,0015	0,0015	0,0014	0,0014
3,0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011	0,0011	0,0011	0,0010	0,0010
3,1	0,0010	0,0009	0,0009	0,0009	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007
3,2	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0005	0,0005	0,0005
3,3	0,0005	0,0005	0,0005	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0003
3,4	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
3,5	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
3,6	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
3,7	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
3,8	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001

$S(x) = 1 - F(x) = P(X > x)$

### A.3 Tabela de constantes para construção das cartas de controlo de variáveis

Tabela A.3: Constantes para a construção das cartas de controlo de variáveis

Dimensão da amostra $n$	$d_2$	$d_3$	$C_4$	Cartas $\bar{X}$ e R			Cartas $\bar{X}$ e S		
				$A_2$	$D_3$	$D_4$	$A_3$	$B_3$	$B_4$
2	1.128	0.8525	0.7979	1.880	-	3.267	2.659	-	3.267
3	1.693	0.8884	0.8862	1.023	-	2.574	1.954	-	2.568
4	2.059	0.8798	0.9213	0.729	-	2.282	1.628	-	2.266
5	2.326	0.8798	0.9400	0.577	-	2.114	1.427	-	2.089
6	2.534	0.8480	0.9515	0.483	-	2.004	1.287	0.030	1.970
7	2.704	0.8332	0.9594	0.419	0.076	1.924	1.182	0.118	1.882
8	2.847	0.8198	0.9650	0.373	0.136	1.864	1.099	0.185	1.815
9	2.970	0.8078	0.9693	0.337	0.184	1.816	1.032	0.239	1.761
10	3.078	0.7971	0.9727	0.308	0.223	1.777	0.975	0.284	1.716
11	3.173	0.7873	0.9754	0.285	0.256	1.744	0.927	0.321	1.679
12	3.258	0.7785	0.9776	0.266	0.283	1.717	0.886	0.354	1.646
13	3.336	0.7704	0.9794	0.249	0.307	1.693	0.850	0.382	1.618
14	3.407	0.7630	0.9810	0.235	0.328	1.672	0.817	0.406	1.594
15	3.472	0.7562	0.9823	0.223	0.347	1.653	0.789	0.428	1.572
16	3.532	0.7499	0.9835	0.212	0.363	1.637	0.763	0.448	1.552
17	3.588	0.7441	0.9845	0.203	0.378	1.662	0.739	0.466	1.534
18	3.640	0.7386	0.9854	0.194	0.391	1.607	0.718	0.482	1.518
19	3.689	0.7335	0.9862	0.187	0.403	1.597	0.698	0.497	1.503
20	3.735	0.7287	0.9869	0.180	0.415	1.585	0.680	0.510	1.490
21	3.778	0.7272	0.9876	0.173	0.425	1.575	0.663	0.523	1.477
22	3.819	0.7199	0.9882	0.167	0.434	1.566	0.647	0.534	1.466
23	3.858	0.1759	0.9887	0.162	0.443	1.557	0.633	0.545	1.455
24	3.895	0.7121	0.9892	0.157	0.451	1.548	0.619	0.555	1.445
25	3.931	0.7084	0.9896	0.153	0.459	1.541	0.606	0.565	1.435

Adaptado de Joglekar, 2003



CÁLCULOS DA FASE *Define*

## B.1 Cálculos auxiliares do modelo TOPSIS

Tabela B.1: Matriz de atributos normalizada ponderada

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
$i_1$	0.111	0.281	0.234	0.055
$i_2$	0.074	0.201	0.117	0.064
$i_3$	0.149	0.201	0.146	0.055

Através da matriz normalizada é possível calcular qual a melhor solução (Tabela B.2) e qual a pior solução (Tabela B.3).

Tabela B.2: Melhor solução

$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
0.074	0.201	0.234	0.055

Tabela B.3: Pior solução

$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$
0.149	0.281	0.117	0.064

Calculou-se as distâncias Euclidianas de cada alternativa  $i$  à melhor solução e à pior solução Tabela B.4 e B.5.

Tabela B.4: Distâncias Euclidianas à melhor solução

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$\Sigma$	$D^+$
$i_1$	0.0014	0.0065	0.0000	0.0000	0.008	0.089
$i_2$	0.0000	0.0000	0.0137	0.0001	0.014	0.117
$i_3$	0.0055	0.0000	0.0077	0.0000	0.013	0.115

Sendo, por exemplo,  $D^+_{11}$  é dado por,

$$D^+_{11} = \sqrt{(0.111 - 0.074)^2 + (0.281 - 0.201)^2 + (0.234 - 0.234)^2 + (0.055 - 0.055)^2} = 0.089 \quad (\text{B.1})$$

Tabela B.5: Distâncias Euclidianas à pior solução

	$j_1$	$j_2$	$j_3$	$j_4$	$\Sigma$	$D^-$
$i_1$	0.0014	0.0000	0.0137	0.0001	0.015	0.123
$i_2$	0.0055	0.0065	0.0000	0.0000	0.012	0.109
$i_3$	0.0000	0.0065	0.0009	0.0001	0.007	0.086

Enquanto, por exemplo,  $D^-_{11}$  é dado por,

$$D^-_{11} = \sqrt{(0.111 - 0.149)^2 + (0.281 - 0.281)^2 + (0.234 - 0.0117)^2 + (0.055 - 0.064)^2} = 0.123 \quad (\text{B.2})$$



## CÁLCULOS DA FASE *Measure*

### C.1 Dados para o cálculo da proporção de defeituosos das moldadoras

Tabela C.1: Proporção de defeituosos dos Equipamentos

Equipamento 1				Equipamento 2			
n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)	n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)
1	47.02	46.08	0.94	1	42.2	40.58	1.62
2	46.72	45.32	1.4	2	43.41	40.93	2.48
3	47.01	45.33	1.68	3	42.58	40.54	2.04
4	47.34	44.89	2.45	4	41.05	39.45	1.6
5	47.73	47.15	0.58	5	43.26	41.33	1.93
6	45.86	45.58	0.28	6	41.82	40.24	1.58
7	47.96	47.34	0.62	7	42.15	40.75	1.4
8	46.55	46.1	0.45	8	41.14	39.61	1.53
9	47.24	47.24	0.00	9	43.4	41.55	1.85
10	47.95	46.41	1.54	10	41.49	40.05	1.44
11	47.76	46.42	1.34	11	43.44	40.99	2.45
12	47.84	47.77	0.07	12	41.56	40.07	1.49
13	47.31	47.16	0.15	13	42.36	40.95	1.41
14	46.72	44.92	1.8	14	42.52	40.57	1.95
15	45.97	45.67	0.3	15	41.72	39.59	2.13
16	47.1	46.12	0.98	16	43.28	40.76	2.52
17	47.51	46.69	0.82	17	41.81	39.51	2.3
18	46.35	45.97	0.38	18	39.89	38.75	1.14
19	45.6	45.55	0.05	19	40.23	38.59	1.64
20	47.67	46.63	1.04	20	40.16	38.15	2.01
21	47.28	46.7	0.58	21	43.72	41.62	2.1

Tabela C.1 – Proporção de defeituosos dos Equipamentos (continuação)

n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)	n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)
22	47.63	46.55	1.08	22	40.91	39.37	1.54
23	46.02	45.51	0.51	23	41.99	40.01	1.98
24	46.8	45.63	1.17	24	42.7	40.39	2.31
25	46.32	45.48	0.84	25	43.38	41	2.38
26	48.64	48.13	0.51	26	42.44	39.95	2.49
27	49.13	47.9	1.23	27	42.39	40.17	2.22
28	47.85	46.68	1.17	28	41.15	40.55	0.6
29	46.62	45.88	0.74	29	43.46	41.61	1.85
30	46.35	46.06	0.29	30	41.08	39.42	1.66
31	48.01	46	2.01	31	42.85	41.27	1.58
32	47.23	46.78	0.45	32	42.79	40.05	2.74
33	47.1	46.88	0.22	33	43.19	41.03	2.16
34	47.68	46.25	1.43	34	41.65	40.06	1.59
35	47.44	45.54	1.9	35	41.84	39.61	2.23
36	48.24	47.31	0.93	36	41.93	39.46	2.47
37	48.8	47.67	1.13	37	41.88	39.47	2.41
38	47.19	46.44	0.75	38	42.51	40.1	2.41
39	47.06	46.05	1.01	39	40.58	39.43	1.15
40	47.67	46.32	1.35	40	41.57	39.32	2.25
41	47.75	47.84	-0.09	41	42.95	40.79	2.16
42	47.04	46.59	0.45	42	42.72	40.67	2.05
43	46.99	46.25	0.74	43	42.4	40.28	2.12
44	47.58	46.53	1.05	44	41.85	39.97	1.88
45	45.91	45.79	0.12	45	43.82	40.81	3.01
46	45.79	45.23	0.56	46	42.4	40.63	1.77
47	47.82	46.79	1.03	47	42.64	40.62	2.02
48	48.45	47.2	1.25	48	41.28	39.6	1.68
49	47.38	46.99	0.39	49	42.34	40.19	2.15
50	47.02	46.58	0.44	50	42.27	39.76	2.51
51	48.02	47.09	0.93	51	42.58	40.72	1.86
52	47.05	45.44	1.61	52	42.52	41.13	1.39
53	47.45	46.41	1.04	53	42.89	41.01	1.88
54	46.83	46.07	0.76	54	42.86	40.67	2.19
55	47.38	45.17	2.21	55	42.12	40.56	1.56
56	48.03	47.46	0.57	56	40.67	39.05	1.62
57	48.53	47.34	1.19	57	41.1	39.22	1.88
58	47.37	46.35	1.02	58	41.06	38.86	2.2
59	48.08	46.72	1.36	59	40.29	38.53	1.76
60	46.53	46.4	0.13	60	39.5	38.35	1.15
61	48.38	48.38	0	61	42.92	40.74	2.18
62	47.48	46.47	1.01	62	41.39	39.9	1.49
63	47.45	46.22	1.23	63	40.91	39.49	1.42
64	47.68	46.54	1.14	64	41.56	40.22	1.34
65	46.09	45.81	0.28	65	42.54	40.44	2.1
66	47.43	46.79	0.64	66	42.44	40.38	2.06



Tabela C.1 – Proporção de defeituosos dos Equipamentos (continuação)

n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)	n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)
67	47.07	46.43	0.64	67	42.1	40.2	1.9
68	47.8	46.35	1.45	68	43.61	41.95	1.66
69	47.63	46.77	0.86	69	42.27	39.52	2.75
70	47.05	46.67	0.38	70	43.27	41.44	1.83
71	47.42	47.36	0.06	71	41.64	40.02	1.62
72	47.07	46.68	0.39	72	43.2	40.6	2.6
73	47.4	45.02	2.38	73	42.28	40.85	1.43
74	47.12	44.97	2.15	74	42.22	40.66	1.56
75	48.13	47.35	0.78	75	43.03	41.37	1.66
76	46.84	46.77	0.07	76	40.36	38.91	1.45
77	46.14	45.98	0.16	77	41.49	39.46	2.03
78	46.29	45.96	0.33	78	41.86	39.86	2
79	46.85	45.74	1.11	79	41.76	39.6	2.16
80	47.45	46.41	1.04	80	41.6	39.24	2.36
81	48.04	47.82	0.22	81	42.58	40.21	2.37
82	46.99	46.97	0.02	82	42.43	40.24	2.19
83	47.35	46.92	0.43	83	41.11	39.83	1.28
84	47.05	46.65	0.4	84	41.69	40.05	1.64
85	46.91	46.16	0.75	85	43.06	41.41	1.65
86	45.94	45.82	0.12	86	41.93	40.11	1.82
87	47.99	47.28	0.71	87	41.29	40.09	1.2
88	47.74	46.77	0.97	88	40.23	38.6	1.63
89	47.84	46.4	1.44	89	41.77	39.92	1.85
90	47.09	46.8	0.29	90	42.64	40.75	1.89
91	47.2	46.65	0.55	91	43.5	41.18	2.32
92	47.9	47.36	0.54	92	42.69	41.21	1.48
93	46.56	44.82	1.74	93	41.82	39.8	2.02
94	47.43	45.72	1.71	94	41.56	39.91	1.65
95	47.13	46.11	1.02	95	42.53	40.66	1.87
96	48.04	47.01	1.03	96	42.78	40.29	2.49
97	47.08	46.21	0.87	97	40.39	39.31	1.08
98	46.75	46.02	0.73	98	40.26	38.44	1.82
99	47.55	46.54	1.01	99	41.36	39.34	2.02
100	46.99	46.02	0.97	100	41.44	39.79	1.65

## C.2 Normalidade dos dados para o Teste p

Antes da realização de qualquer teste estatístico, é necessário que se verifique se os dados se encontram normalmente distribuídos, sob pena de se tirarem conclusões erradas acerca das populações. Assim, utilizou-se o *software* Minitab para verificar a normalidade de ambas as populações, através do teste de Kolmogorov-Smirnov.

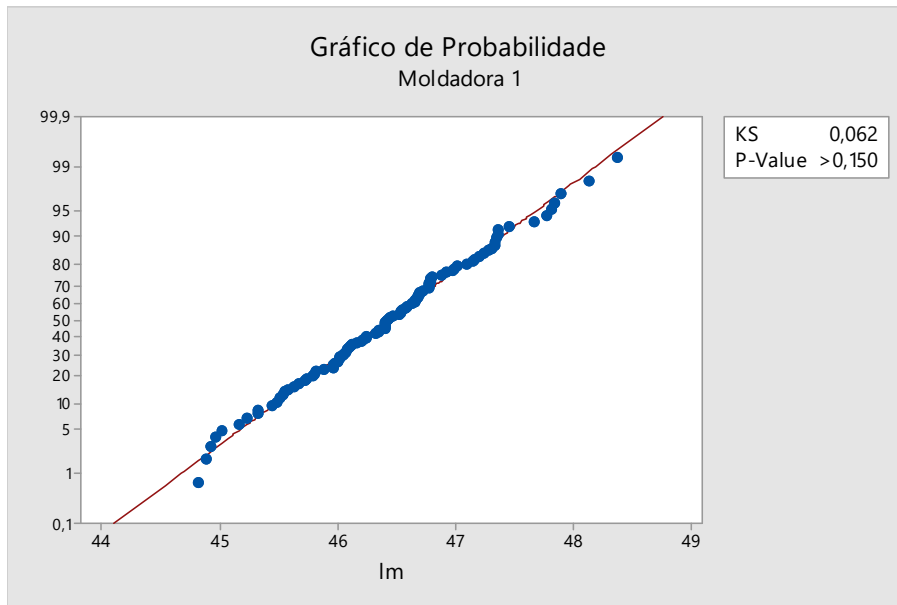


Figura C.1: Gráfico de Probabilidade - Equipamento 1

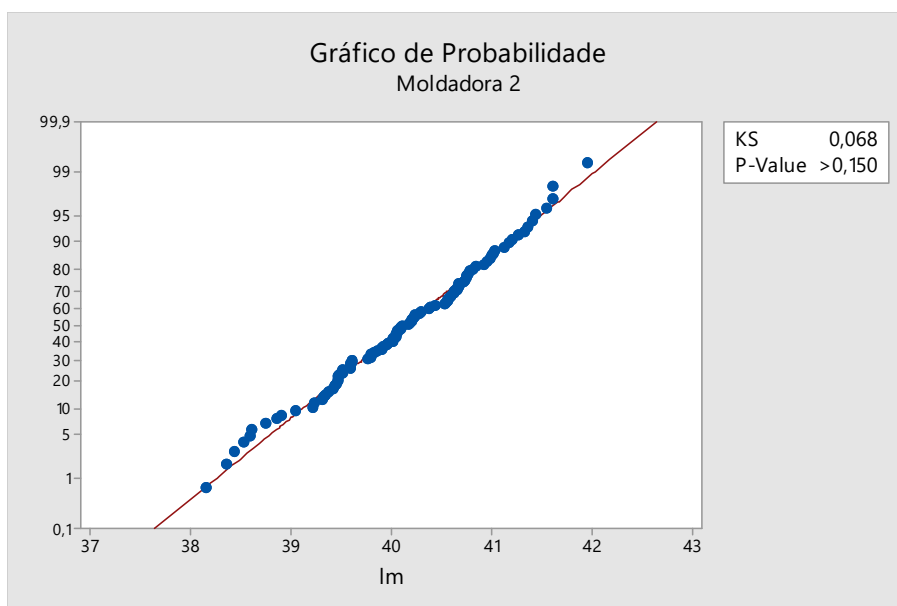


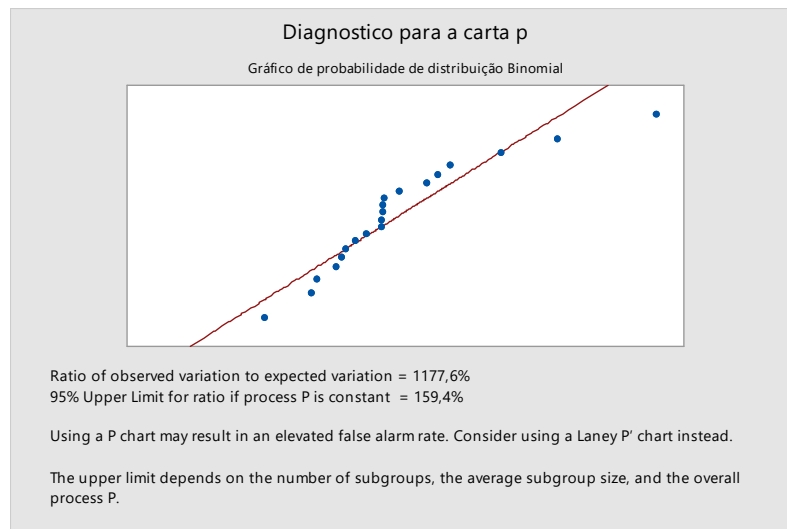
Figura C.2: Gráfico de Probabilidade - Equipamento 2

Conforme se pode ver nas Figuras C.1 e C.2 ambos os valores se distribuem uniformemente sobre uma linha, por outro lado o valor de  $p - value > 0.150$  pelo que é maior que o nível de significância  $\alpha = 0.05$  portanto, não se rejeita a hipótese nula do teste de Kolmogorov-Smirnov e conclui-se que ambas as populações são normalmente distribuídas.

## C.3 Construção da carta Laney p'

### C.3.0.1 Teste diagnóstico do *Minitab*

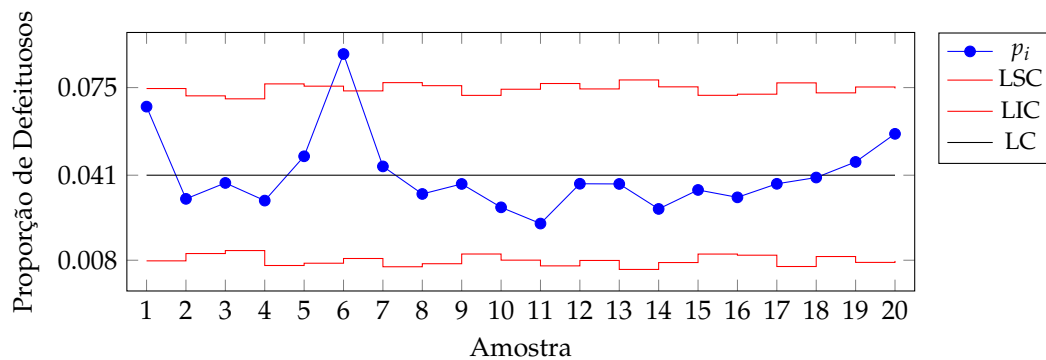
Figura C.3: Teste diagnóstico do *Minitab*



### C.3.0.2 Fase 1 da carta Laney $p'$

Tabela C.2: Dados para construção da Carta Laney  $p'$ 

Amostra	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$Z_i$	$R_i$	$p_i$	LSC	LC	LIC
1	58745	3972	0.0676	32.22	-	0.068	0.075	0.041	0.008
2	70146	2232	0.0318	-12.50	44.71	0.032	0.072	0.041	0.011
3	75769	2879	0.0380	-4.43	8.06	0.038	0.071	0.041	0.012
4	52886	1647	0.0311	-11.63	7.20	0.031	0.076	0.041	0.006
5	55643	2690	0.0483	8.48	20.12	0.048	0.076	0.041	0.007
6	62101	5467	0.0880	58.73	50.24	0.088	0.074	0.041	0.009
7	51451	2285	0.0444	3.67	55.06	0.044	0.077	0.041	0.005
8	55019	1855	0.0337	-8.83	12.50	0.034	0.076	0.041	0.007
9	69326	2607	0.0376	-4.76	4.07	0.038	0.072	0.041	0.010
10	59722	1704	0.0285	-15.57	10.81	0.029	0.074	0.041	0.008
11	52455	1166	0.0222	-21.86	6.29	0.022	0.077	0.041	0.006
12	59289	2234	0.0377	-4.31	17.55	0.038	0.074	0.041	0.008
13	48580	1827	0.0376	-3.98	0.33	0.038	0.078	0.041	0.004
14	56508	1577	0.0279	-15.90	11.92	0.028	0.075	0.041	0.007
15	69227	2442	0.0353	-7.84	8.06	0.035	0.072	0.041	0.010
16	67297	2181	0.0324	-11.47	3.63	0.032	0.072	0.041	0.010
17	51727	1948	0.0377	-4.05	7.42	0.038	0.077	0.041	0.006
18	65115	2611	0.0401	-1.41	2.64	0.040	0.073	0.041	0.009
19	56684	2616	0.0462	5.93	7.34	0.046	0.075	0.041	0.007
20	58630	3345	0.0571	19.32	13.38	0.057	0.075	0.041	0.008

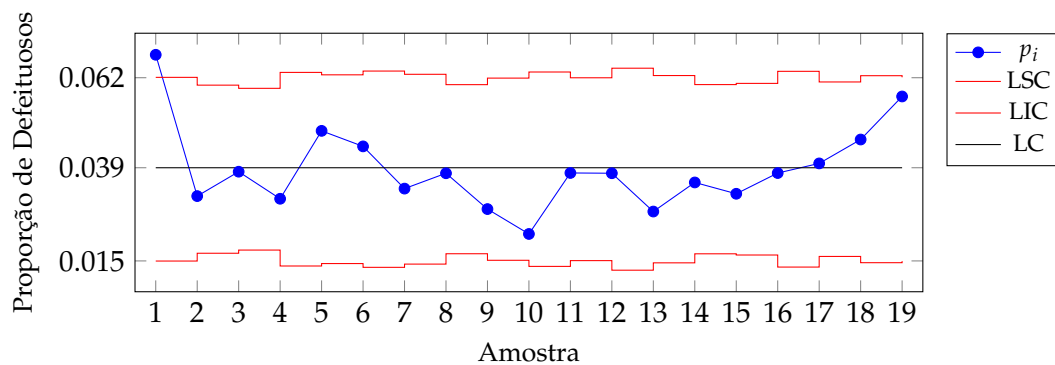
Figura C.4: Carta Laney  $p'$ 


O ponto 6 encontra-se fora do limite superior de controlo pelo que vai ser retirado e proceder-se-á a novos cálculos.

Tabela C.3: Dados para construção da Carta Laney p' (v1)

Amostra	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$Z_i$	$R_i$	$p_i$	LSC	LC	LIC
1	58745	3972	0.0676	36.45	-	0.0676	0.0619	0.039	0.0154
2	70146	2232	0.0318	-9.36	45.81	0.0318	0.0599	0.039	0.0173
3	75769	2879	0.0380	-0.91	8.46	0.0380	0.0591	0.039	0.0181
4	52886	1647	0.0311	-8.94	8.03	0.0311	0.0632	0.039	0.0141
5	55643	2690	0.0483	11.89	20.82	0.0483	0.0625	0.039	0.0147
6	51451	2285	0.0444	6.80	5.09	0.0444	0.0635	0.039	0.0138
7	55019	1855	0.0337	-5.98	12.79	0.0337	0.0627	0.039	0.0146
8	69326	2607	0.0376	-1.40	4.58	0.0376	0.0600	0.039	0.0172
9	59722	1704	0.0285	-12.81	11.40	0.0285	0.0617	0.039	0.0156
10	52455	1166	0.0222	-19.50	6.69	0.0222	0.0633	0.039	0.0140
11	59289	2234	0.0377	-1.20	18.29	0.0377	0.0618	0.039	0.0155
12	48580	1827	0.0376	-1.17	0.03	0.0376	0.0642	0.039	0.0131
13	56508	1577	0.0279	-13.23	12.06	0.0279	0.0624	0.039	0.0149
14	69227	2442	0.0353	-4.58	8.65	0.0353	0.0601	0.039	0.0172
15	67297	2181	0.0324	-8.38	3.79	0.0324	0.0604	0.039	0.0169
16	51727	1948	0.0377	-1.15	7.23	0.0377	0.0634	0.039	0.0138
17	65115	2611	0.0401	1.94	3.09	0.0401	0.0607	0.039	0.0165
18	56684	2616	0.0462	9.29	7.35	0.0462	0.0623	0.039	0.0150
19	58630	3345	0.0571	23.14	13.86	0.0571	0.0619	0.039	0.0153

Figura C.5: Carta Laney p' (v1)

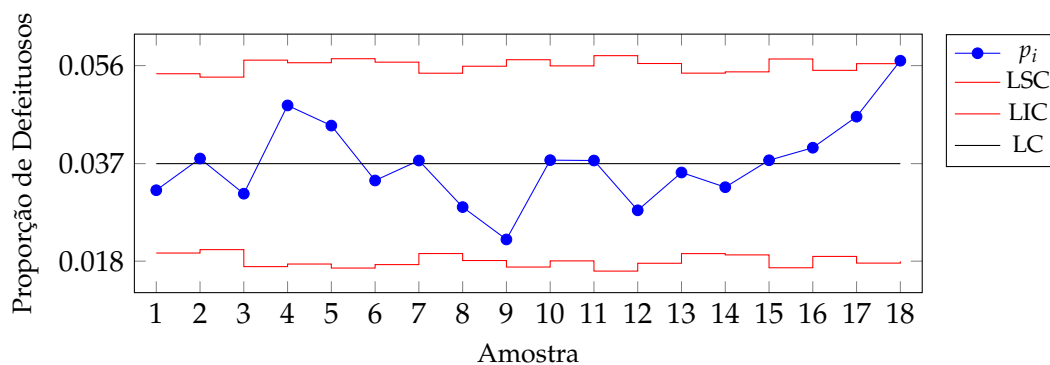


O ponto 1 encontra-se fora do limite superior de controlo pelo que vai ser retirado e proceder-se-á a novos cálculos.

Tabela C.4: Dados para construção da Carta Laney  $p'$  (v2)

Amostra	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$Z_i$	$R_i$	$p_i$	LSC	LC	LIC
1	70146	2232	0.0318	-5.80	-	0.0318	0.0529	0.0359	0.0189
2	75769	2879	0.0380	3.11	8.91	0.0380	0.0522	0.0359	0.0195
3	52886	1647	0.0311	-5.88	8.99	0.0311	0.0555	0.0359	0.0163
4	55643	2690	0.0483	15.78	21.66	0.0483	0.0550	0.0359	0.0168
5	51451	2285	0.0444	10.38	5.40	0.0444	0.0557	0.0359	0.0161
6	55019	1855	0.0337	-2.75	13.13	0.0337	0.0551	0.0359	0.0167
7	69326	2607	0.0376	2.42	5.17	0.0376	0.0530	0.0359	0.0188
8	59722	1704	0.0285	-9.67	12.09	0.0285	0.0543	0.0359	0.0175
9	52455	1166	0.0222	-16.83	7.15	0.0222	0.0555	0.0359	0.0163
10	59289	2234	0.0377	2.33	19.16	0.0377	0.0544	0.0359	0.0174
11	48580	1827	0.0376	2.03	0.31	0.0376	0.0563	0.0359	0.0155
12	56508	1577	0.0279	-10.21	12.24	0.0279	0.0548	0.0359	0.0170
13	69227	2442	0.0353	-0.88	9.33	0.0353	0.0530	0.0359	0.0188
14	67297	2181	0.0324	-4.86	3.99	0.0324	0.0532	0.0359	0.0186
15	51727	1948	0.0377	2.16	7.02	0.0377	0.0557	0.0359	0.0161
16	65115	2611	0.0401	5.76	3.61	0.0401	0.0535	0.0359	0.0183
17	56684	2616	0.0462	13.12	7.36	0.0462	0.0548	0.0359	0.0170

Figura C.6: Carta Laney  $p'$  (v2)

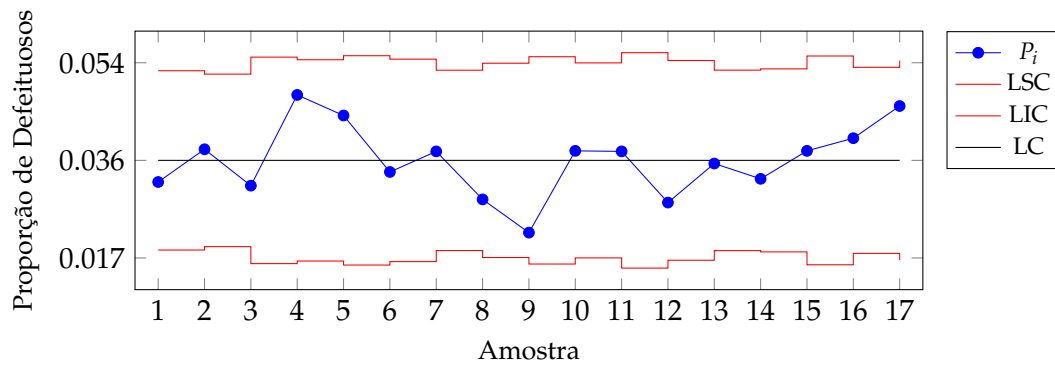


O ponto 18 encontra-se fora do limite superior de controlo pelo que vai ser retirado e proceder-se-á a novos cálculos.

Tabela C.5: Dados para construção da Carta Laney p' (v2)

Amostra	$n_i$	$d_i$	$p_i$	$Z_i$	$R_i$	$p_i$	LSC	LC	LIC
1	70146	2232	0.0318	-5.80	-	0.0318	0.0529	0.0359	0.0189
2	75769	2879	0.0380	3.11	8.91	0.0380	0.0522	0.0359	0.0195
3	52886	1647	0.0311	-5.88	8.99	0.0311	0.0555	0.0359	0.0163
4	55643	2690	0.0483	15.78	21.66	0.0483	0.0550	0.0359	0.0168
5	51451	2285	0.0444	10.38	5.40	0.0444	0.0557	0.0359	0.0161
6	55019	1855	0.0337	-2.75	13.13	0.0337	0.0551	0.0359	0.0167
7	69326	2607	0.0376	2.42	5.17	0.0376	0.0530	0.0359	0.0188
8	59722	1704	0.0285	-9.67	12.09	0.0285	0.0543	0.0359	0.0175
9	52455	1166	0.0222	-16.83	7.15	0.0222	0.0555	0.0359	0.0163
10	59289	2234	0.0377	2.33	19.16	0.0377	0.0544	0.0359	0.0174
11	48580	1827	0.0376	2.03	0.31	0.0376	0.0563	0.0359	0.0155
12	56508	1577	0.0279	-10.21	12.24	0.0279	0.0548	0.0359	0.0170
13	69227	2442	0.0353	-0.88	9.33	0.0353	0.0530	0.0359	0.0188
14	67297	2181	0.0324	-4.86	3.99	0.0324	0.0532	0.0359	0.0186
15	51727	1948	0.0377	2.16	7.02	0.0377	0.0557	0.0359	0.0161
16	65115	2611	0.0401	5.76	3.61	0.0401	0.0535	0.0359	0.0183
17	56684	2616	0.0462	13.12	7.36	0.0462	0.0548	0.0359	0.0170

Figura C.7: Carta Laney p' (v3)







## CÁLCULOS DA FASE *Analyze*

### D.1 Estudo da repetibilidade

#### D.1.1 Característica da qualidade: característica 1

Tabela D.1: Dados para estudo da repetibilidade: característica 1

Unidade nºº	Medição por unidade ( <i>r</i> )						$\bar{X}$	<i>R</i>
	1	2	3	4	5	6		
1	45.15	45.15	45.14	45.12	45.13	45.13	45.137	0.03
2	45.80	45.83	45.85	45.77	45.84	45.74	45.805	0.11
3	44.46	44.48	44.46	44.46	44.45	44.44	44.458	0.04
4	42.89	42.90	42.89	42.87	42.88	42.87	42.883	0.03
5	43.58	43.61	43.61	43.60	43.59	43.54	43.588	0.07
6	45.16	45.14	45.13	45.15	45.13	45.11	45.137	0.05
7	42.59	42.57	42.59	42.55	42.56	42.56	42.570	0.04
8	45.40	45.33	45.39	45.35	45.31	45.35	45.355	0.09
9	44.73	44.70	44.75	44.66	44.71	44.65	44.700	0.10
10	44.95	44.97	44.93	44.90	44.90	44.89	44.923	0.08
11	44.16	44.16	44.15	44.15	44.14	44.14	44.150	0.02
12	43.70	43.66	43.58	43.55	43.56	43.62	43.612	0.15
13	43.49	43.48	43.45	43.46	43.45	43.45	43.463	0.04
14	44.92	44.91	44.83	44.77	44.86	44.87	44.860	0.15
15	45.89	45.89	45.86	45.85	45.82	45.84	45.858	0.07
16	45.74	45.84	45.74	45.80	45.72	45.72	45.760	0.12
17	45.29	45.32	45.31	45.26	45.29	45.32	45.298	0.06
18	44.28	44.32	44.30	44.35	44.27	44.24	44.293	0.11
19	44.80	44.83	44.83	44.79	44.76	44.80	44.802	0.07
20	44.67	44.71	44.65	44.66	44.63	44.65	44.662	0.08

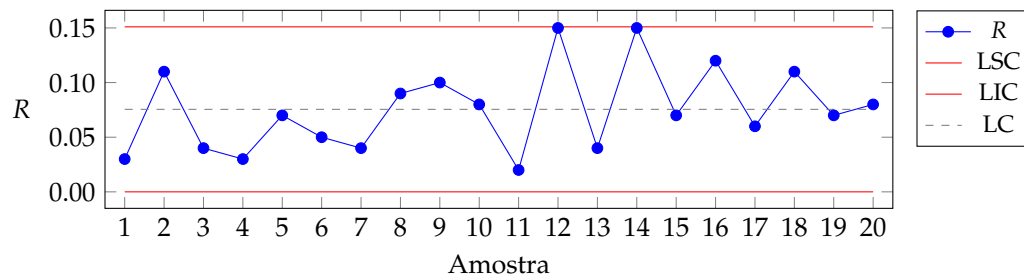


Figura D.1: Carta  $R$  para a característica 1

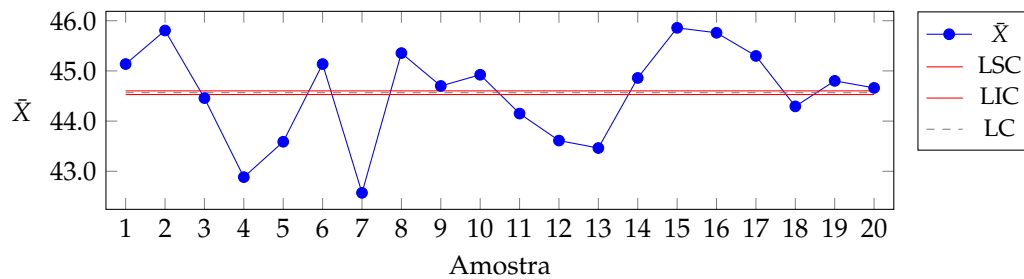
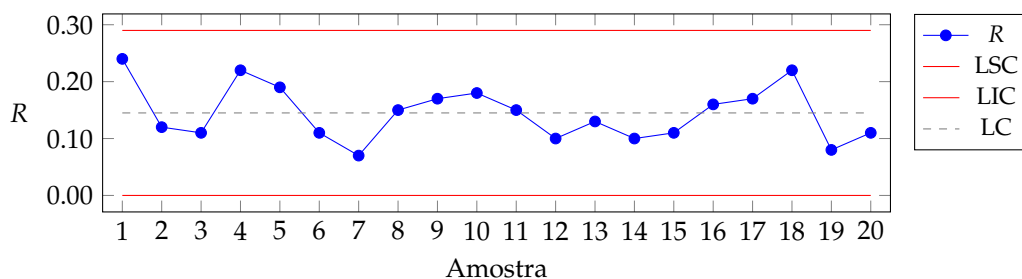
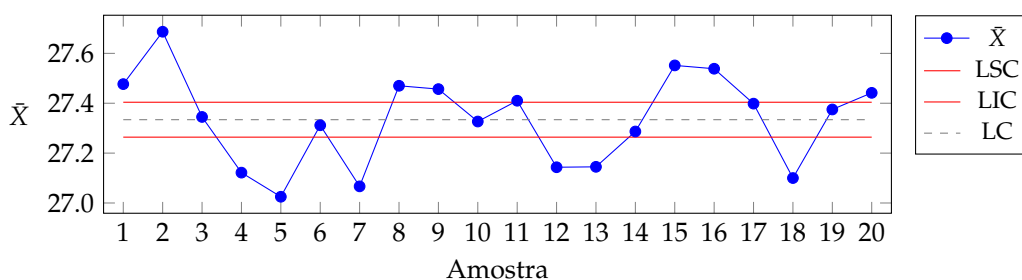


Figura D.2: Carta  $\bar{X}$  para a característica 1

## D.1.2 Característica da qualidade: característica 2

Tabela D.2: Dados para estudo da repetibilidade: característica 2

Unidade nºº	Medição por unidade ( $r$ )						$\bar{X}$	$R$
	1	2	3	4	5	6		
1	27.47	27.61	27.38	27.37	27.58	27.45	27.477	0.24
2	27.70	27.65	27.71	27.72	27.61	27.73	27.687	0.12
3	27.34	27.31	27.42	27.33	27.34	27.33	27.345	0.11
4	27.17	27.24	27.02	27.11	27.13	27.06	27.122	0.22
5	26.97	26.96	27.01	27.15	27.02	27.04	27.025	0.19
6	27.28	27.26	27.36	27.37	27.27	27.33	27.312	0.11
7	27.09	27.06	27.03	27.07	27.10	27.05	27.067	0.07
8	27.39	27.54	27.52	27.42	27.43	27.52	27.470	0.15
9	27.39	27.49	27.48	27.39	27.43	27.56	27.457	0.17
10	27.31	27.29	27.44	27.35	27.26	27.31	27.327	0.18
11	27.39	27.49	27.36	27.48	27.40	27.34	27.410	0.15
12	27.08	27.18	27.14	27.17	27.15	27.14	27.143	0.10
13	27.17	27.12	27.14	27.21	27.15	27.08	27.145	0.13
14	27.27	27.24	27.34	27.25	27.32	27.30	27.287	0.10
15	27.50	27.57	27.52	27.61	27.54	27.57	27.552	0.11
16	27.46	27.62	27.60	27.60	27.47	27.48	27.538	0.16
17	27.37	27.41	27.41	27.31	27.48	27.41	27.398	0.17
18	26.97	27.19	27.17	27.05	27.06	27.16	27.100	0.22
19	27.36	27.34	27.40	27.42	27.36	27.37	27.375	0.08
20	27.46	27.49	27.42	27.43	27.38	27.47	27.442	0.11

Figura D.3: Carta  $R$  para a característica 2Figura D.4: Carta  $\bar{X}$  para a característica 2

### D.1.3 Característica da qualidade: característica 3

Tabela D.3: Dados para estudo da repetibilidade: característica 3

Unidade nºº	Medição por unidade ( $r$ )						$\bar{X}$	$R$
	1	2	3	4	5	6		
1	6.94	6.94	6.94	6.93	6.93	6.93	6.935	0.01
2	6.99	6.99	6.99	6.98	6.99	6.98	6.987	0.01
3	6.81	6.82	6.81	6.80	6.81	6.81	6.810	0.02
4	6.61	6.62	6.61	6.60	6.61	6.61	6.610	0.02
5	6.75	6.75	6.74	6.74	6.74	6.74	6.743	0.01
6	6.82	6.83	6.82	6.82	6.82	6.82	6.822	0.01
7	6.57	6.57	6.56	6.55	6.56	6.56	6.562	0.02
8	6.96	6.95	6.95	6.94	6.94	6.94	6.947	0.02
9	6.87	6.86	6.86	6.85	6.86	6.86	6.860	0.02
10	6.79	6.78	6.79	6.78	6.78	6.78	6.783	0.01
11	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80	6.800	0.00
12	6.74	6.74	6.74	6.73	6.73	6.73	6.735	0.01
13	6.63	6.63	6.64	6.63	6.63	6.63	6.632	0.01
14	6.91	6.91	6.92	6.91	6.91	6.91	6.912	0.01
15	7.10	7.10	7.10	7.09	7.11	7.10	7.100	0.02
16	6.93	6.92	6.92	6.91	6.92	6.92	6.920	0.02
17	6.93	6.92	6.92	6.91	6.92	6.92	6.920	0.02
18	6.47	6.46	6.46	6.46	6.47	6.47	6.465	0.01
19	6.90	6.88	6.88	6.87	6.89	6.89	6.885	0.03
20	6.81	6.78	6.78	6.78	6.80	6.81	6.793	0.03

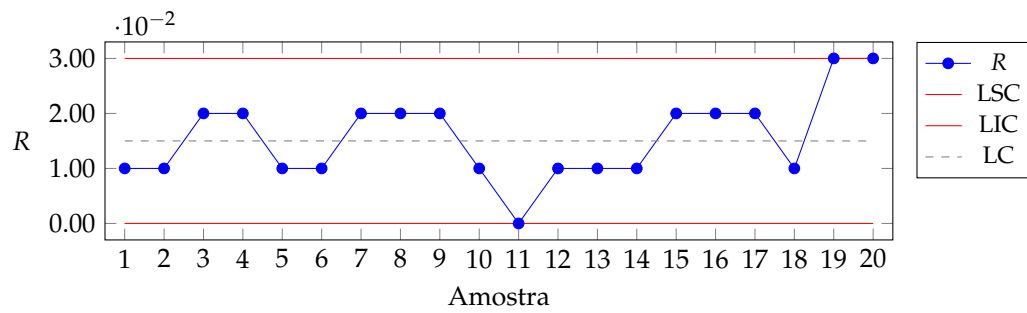


Figura D.5: Carta  $R$  para a característica 3

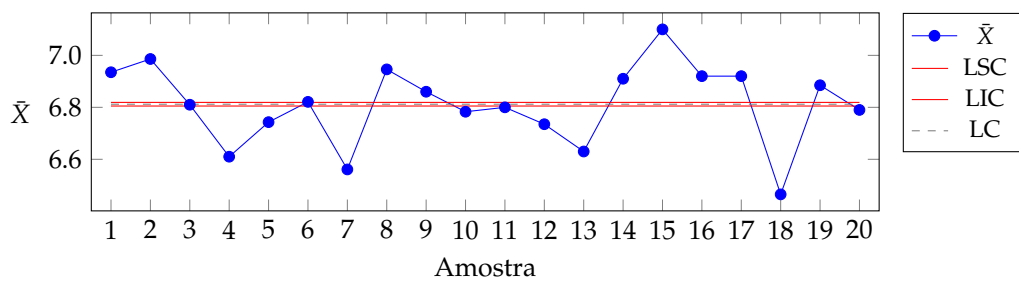


Figura D.6: Carta  $\bar{X}$  para a característica 3

## D.2 Avaliação da taxa de compressão

### D.2.1 Dados para a construção do histograma

Tabela D.4: Dados para estudo da taxa de compressão

Amostra	$MV_{Ing.1}$	$H_{Ing.1}$	$m_{Ing.2}$	$MV_{mistura}$	$h$	$TC$
1	72.3	9.0	2.07	87.38	150.95	4.1
2	72.1	8.8	2.15	87.27	151.13	4.1
3	73.9	9.4	1.90	89.02	148.17	4.0
4	71.2	9.1	2.02	86.01	153.35	4.1
5	74.5	10.4	1.49	89.06	148.10	4.0
6	74.6	11.4	1.07	88.51	149.02	4.0
7	74.8	10.5	1.45	89.34	147.62	4.0
8	73.4	10.3	1.53	87.83	150.17	4.1
9	73.0	10.8	1.32	87.03	151.55	4.1
10	73.5	10.5	1.45	87.82	150.19	4.1
11	72.2	10.9	1.28	86.03	153.32	4.1
12	73.2	10.1	1.61	87.73	150.35	4.1
13	73.5	10.7	1.36	87.68	150.42	4.1

Tabela D.4 – Dados para estudo da taxa de compressão (continuação)

Amostra	$MV_{Ing.1}$	$H_{Ing.1}$	$m_{Ing.2}$	$MV_{mistura}$	$h$	$TC$
14	72.9	10.5	1.45	87.11	151.41	4.1
15	73.0	10.6	1.40	87.16	151.32	4.1
16	73.7	10.7	1.36	87.92	150.02	4.1
17	73.2	10.5	1.45	87.46	150.80	4.1
18	73.4	10.8	1.32	87.50	150.74	4.1
19	75.5	11.2	1.16	89.69	147.05	4.0
20	73.7	11.0	1.24	87.72	150.36	4.1
21	74.0	10.7	1.36	88.27	149.42	4.0
22	77.1	11.0	1.24	91.70	143.82	3.9
23	75.9	10.6	1.40	90.57	145.62	3.9
24	74.3	11.3	1.12	88.22	149.50	4.0
25	77.4	11.7	0.95	91.57	144.03	3.9
26	75.2	10.7	1.36	89.68	147.07	4.0
27	74.5	10.6	1.40	88.93	148.32	4.0
28	73.9	10.9	1.28	88.02	149.84	4.0
29	72.9	10.9	1.28	86.85	151.87	4.1
30	74.6	11.3	1.12	88.57	148.91	4.0
31	73.8	10.6	1.40	88.10	149.70	4.0
32	74.2	10.9	1.28	88.37	149.25	4.0
33	73.9	9.7	1.78	88.82	148.50	4.0
34	74.4	10.5	1.45	88.87	148.40	4.0
35	73.9	10.5	1.45	88.29	149.39	4.0
36	73.1	10.4	1.49	87.41	150.89	4.1
37	73.3	10.0	1.65	87.91	150.03	4.1
38	76.5	10.2	1.57	91.55	144.07	3.9
39	78.4	11.4	1.07	92.95	141.90	3.8
40	76.1	11.2	1.16	90.40	145.90	3.9
41	75.9	10.9	1.28	90.37	145.95	3.9
42	74.2	10.3	1.53	88.77	148.57	4.0
43	74.7	10.1	1.61	89.50	147.37	4.0
44	74.6	10.6	1.40	89.04	148.12	4.0
45	75.0	10.2	1.57	89.78	146.90	4.0
46	74.7	10.5	1.45	89.23	147.82	4.0
47	74.4	11.3	1.12	88.34	149.30	4.0
48	73.3	10.0	1.65	87.91	150.03	4.1

Tabela D.4 – Dados para estudo da taxa de compressão (continuação)

Amostra	$MV_{Ing,1}$	$H_{Ing,1}$	$m_{Ing,2}$	$MV_{mistura}$	$h$	$TC$
49	72.5	10.4	1.49	86.70	152.12	4.1
50	73.0	10.1	1.61	87.49	150.75	4.1
51	74.7	11.0	1.24	88.89	148.37	4.0
52	73.1	10.6	1.40	87.28	151.12	4.1
53	73.0	10.6	1.40	87.16	151.32	4.1
54	75.0	10.5	1.45	89.58	147.23	4.0
55	75.3	10.0	1.65	90.27	146.11	3.9
56	74.4	10.3	1.53	89.01	148.18	4.0
57	76.0	10.0	1.65	91.10	144.78	3.9
58	73.4	11.0	1.24	87.37	150.96	4.1
59	76.4	10.6	1.40	91.16	144.69	3.9
60	73.5	10.9	1.28	87.55	150.65	4.1
61	73.8	11.2	1.16	87.70	150.38	4.1
62	74.8	10.6	1.40	89.28	147.73	4.0
63	74.5	11.3	1.12	88.46	149.10	4.0
64	75.1	10.8	1.32	89.50	147.37	4.0
65	73.2	10.8	1.32	87.26	151.14	4.1
66	73.8	10.6	1.40	88.10	149.70	4.0
67	74.3	11.5	1.03	88.09	149.73	4.0
68	73.8	11.4	1.07	87.57	150.61	4.1
69	73.1	10.5	1.45	87.34	151.00	4.1
70	77.1	11.3	1.10	91.48	144.18	3.9
71	75.5	10.8	1.32	89.97	146.60	4.0
72	75.3	11.2	1.16	89.46	147.43	4.0
73	74.6	10.6	1.40	89.04	148.12	4.0
74	74.2	12.8	0.50	87.10	151.42	4.1
75	73.8	11.0	1.24	87.84	150.16	4.1
76	73.8	10.2	1.57	88.37	149.26	4.0
77	73.2	11.2	1.16	87.00	151.60	4.1
78	73.6	10.8	1.32	87.73	150.33	4.1
79	73.9	10.6	1.40	88.22	149.50	4.0
80	74.2	10.9	1.29	88.39	149.21	4.0
81	76.6	9.2	1.98	92.35	142.82	3.9
82	74.8	9.5	1.86	90.02	146.52	4.0
83	74.0	9.2	1.97	89.25	147.77	4.0

Tabela D.4 – Dados para estudo da taxa de compressão (continuação)

Amostra	$MV_{Ing.1}$	$H_{Ing.1}$	$m_{Ing.2}$	$MV_{mistura}$	$h$	$TC$
84	77.6	8.2	2.40	94.24	139.95	3.8
85	76.5	11.1	1.20	90.93	145.04	3.9
86	77.5	11.3	1.12	91.96	143.42	3.9
87	77.9	11.5	1.03	92.29	142.91	3.9
88	76.1	10.4	1.49	90.94	145.03	3.9
89	76.2	10.8	1.32	90.79	145.28	3.9
90	76.5	10.3	1.53	91.48	144.18	3.9
91	75.0	10.4	1.49	89.65	147.12	4.0
92	74.3	10.7	1.36	88.62	148.82	4.0
93	74.8	10.5	1.45	89.34	147.62	4.0
94	76.4	11.5	1.03	90.54	145.67	3.9
95	78.4	12.6	0.58	92.11	143.20	3.9
96	78.0	11.9	0.87	92.13	143.16	3.9
97	77.6	11.4	1.07	92.01	143.34	3.9
98	76.6	11.2	1.16	90.98	144.97	3.9
99	77.8	11.2	1.16	92.38	142.76	3.9
100	76.0	10.3	1.53	90.89	145.11	3.9







## CÁLCULOS DA FASE *Improve*

### E.1 Estudo do parâmetro *tandem*

#### E.1.1 Dados recolhidos

Tabela E.1: Dados para o estudo do parâmetro *tandem*

Sem <i>tandem</i>				Com <i>tandem</i>			
n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)	n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)
1	42.25	39.92	2.33	1	44.73	43.80	0.93
2	41.89	40.32	1.57	2	44.10	43.30	0.80
3	42.15	40.38	1.77	3	44.01	43.07	0.94
4	41.20	39.36	1.84	4	43.53	43.24	0.29
5	39.80	38.02	1.78	5	44.01	43.60	0.41
6	43.02	41.27	1.75	6	44.41	43.51	0.90
7	44.65	42.60	2.05	7	44.97	44.67	0.30
8	42.91	41.83	1.08	8	43.77	43.47	0.30
9	44.26	42.20	2.06	9	44.04	43.19	0.85
10	45.26	44.06	1.20	10	44.32	44.06	0.26
11	43.64	41.95	1.69	11	43.98	43.38	0.60
12	44.80	42.47	2.33	12	44.25	43.70	0.55
13	43.20	40.42	2.78	13	44.03	43.83	0.20
14	43.74	42.35	1.39	14	44.32	44.18	0.14
15	41.10	39.47	1.63	15	44.23	43.79	0.44
16	44.64	42.73	1.91	16	43.32	42.72	0.60
17	42.14	40.29	1.85	17	45.04	44.79	0.25
18	43.20	41.84	1.36	18	43.87	43.79	0.08

Tabela E.1 – Dados para o estudo do parâmetro *tandem* (continuação)

n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)	n	LM (mm)	lm (mm)	Flecha (mm)
19	43.19	41.14	2.05	19	43.81	42.50	1.31
20	43.04	42.05	0.99	20	43.41	43.05	0.36
21	43.32	41.91	1.41	21	42.19	41.82	0.37
22	42.76	41.75	1.01	22	42.92	41.78	1.14
23	43.86	42.18	1.68	23	43.99	43.70	0.29
24	44.08	42.35	1.73	24	42.87	42.39	0.48
25	43.68	42.49	1.19	25	42.44	42.12	0.32
26	43.85	42.75	1.10	26	42.18	41.74	0.44
27	42.97	41.78	1.19	27	43.38	43.18	0.20
28	44.39	41.93	2.46	28	43.41	43.14	0.27
29	44.45	42.19	2.26	29	42.49	42.28	0.21
30	42.91	41.17	1.74	30	42.82	42.35	0.47
31	43.49	42.10	1.39	31	42.80	42.01	0.79
32	44.08	42.63	1.45	32	43.74	42.79	0.95
33	44.16	43.55	0.61	33	43.37	42.71	0.66
34	42.00	40.93	1.07	34	43.49	43.09	0.40
35	43.99	42.25	1.74	35	43.01	42.40	0.61
36	44.69	42.75	1.94	36	43.19	42.28	0.91
37	44.47	42.20	2.27	37	43.03	41.81	1.22
38	44.02	41.78	2.24	38	44.01	43.78	0.23
39	43.28	41.98	1.30	39	42.54	42.12	0.42
40	44.02	41.01	3.01	40	43.17	42.87	0.30
41	44.47	42.36	2.11	41	42.40	41.89	0.51
42	43.33	41.75	1.58	42	42.44	41.97	0.47
43	42.27	41.07	1.20	43	43.91	43.29	0.62
44	43.64	42.25	1.39	44	42.12	41.79	0.33
45	43.40	42.36	1.04	45	42.40	41.88	0.52
46	44.80	42.17	2.63	46	42.89	42.06	0.83
47	43.75	42.12	1.63	47	44.14	43.32	0.82
48	43.06	42.03	1.03	48	44.06	42.73	1.33
49	44.70	42.37	2.33	49	43.01	42.39	0.62
50	43.83	41.77	2.06	50	43.73	42.96	0.77

### E.1.2 Verificação da normalidade

Para verificar a normalidade dos dados utilizou-se o *software* Minitab, que recorre ao teste Kolmogorov-Smirnov. Conforme se pode ver nas Figuras E.1 e E.2 ambos os valores se distribuem uniformemente sobre uma linha, por outro lado o valor de  $p - value > 0.150$  pelo que é maior que o nível de significância  $\alpha = 0.05$  portanto, não se rejeita a

hipótese nula do teste de Kolmogorov-Smirnov e conclui-se que ambas as populações são normalmente distribuídas.

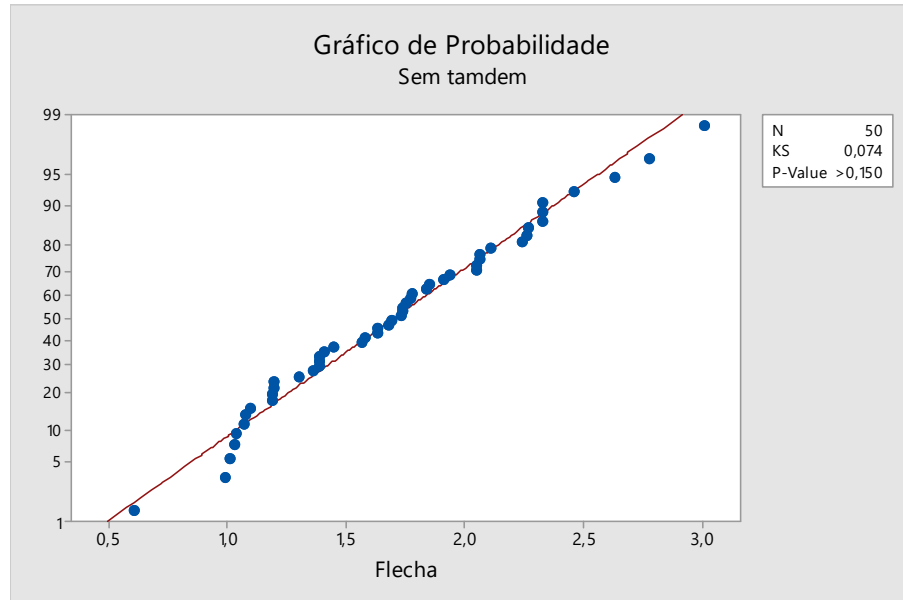


Figura E.1: Gráfico de Probabilidade - Sem *tandem*

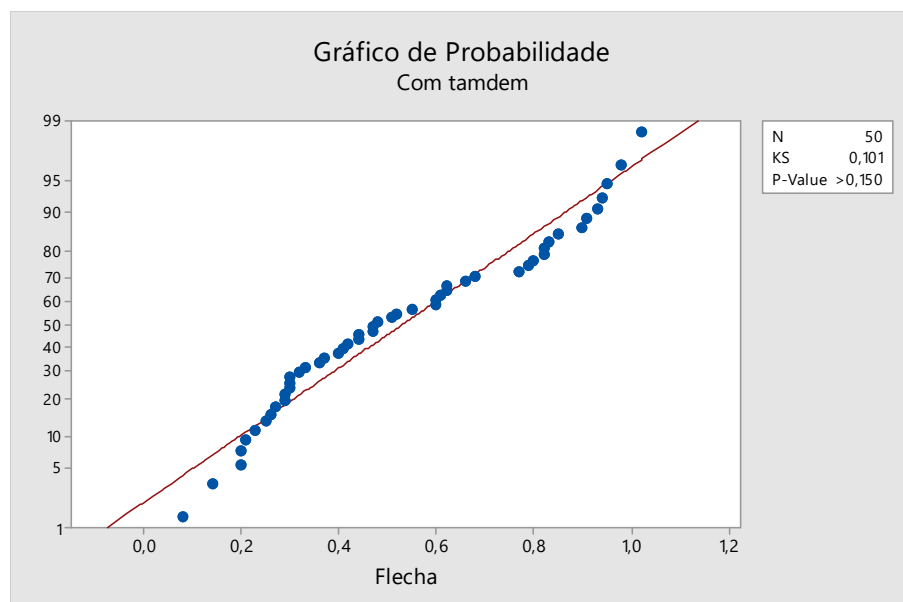


Figura E.2: Gráfico de Probabilidade - Com *tandem*

Tabela E.2: Valores para o tratamento dos dados pela média

Exp <sup>a</sup> .	Fator				Resposta (mm)			
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Erro	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	Σ
1	115	45	0.1	1	42.22	42.30	42.64	127.16
2	115	50	0.2	2	43.16	42.89	42.96	129.01
3	115	55	0.3	3	43.65	41.75	41.56	126.97
4	120	45	0.2	3	42.75	42.67	42.59	128.02
5	120	50	0.3	1	43.62	42.51	42.92	129.05
6	120	55	0.1	2	43.61	42.49	43.04	129.14
7	125	45	0.3	2	42.67	43.39	42.93	128.99
8	125	50	0.1	3	43.21	41.42	42.45	127.07
9	125	55	0.2	1	44.14	42.49	41.94	128.57

## E.2 Método de Taguchi

### E.2.1 Cálculos do tratamento pela média

Numa primeira fase, de forma a facilitar os cálculos começou-se por calcular o fator de correção (FC),

$$FC = \frac{(42.22 + 42.30 + \dots + 41.94)^2}{27} = 49320.2 \quad (\text{E.1})$$

por sua vez, o  $SS_T$  é dado por,

$$SS_T = (42.22^2 + 42.30^2 + \dots + 41.94^2) - FC = 10.88 \quad (\text{E.2})$$

enquanto os SS dos fatores e da primeira estimativa do erro foram calculados como no exemplo seguinte para o Fator 1,

$$SS_{FQ} = \frac{(127.16 + 129.01 + 126.97)^2 + (\dots)^2 + (128.99 + 127.07 + 128.57)^2}{9} - FC = 0.526 \quad (\text{E.3})$$

### E.2.2 Cálculos do tratamento pelo índice sinal-ruído

Primeiramente, utilizou-se o índice-sinal *nominal-é-melhor* para transformar os valores das respostas observados. Em seguida calculou-se o valor de  $T$ , homólogo do  $FC$ ,

$$T = \frac{(45.47 + 49.70 + \dots + 31.47)^2}{9} = 14609.15 \quad (\text{E.4})$$

O  $SS_T$  é calculado de forma idêntica ao tratamento pela média, vindo,

$$SS_T = (45.47^2 + 49.70^2 + \dots + 31.47^2) - T = 533.85 \quad (\text{E.5})$$

Por último o SS dos fatores é calculado como no seguinte exemplo,

$$SS_{FQ} = \frac{(45.47 + 49.70 + 31.29)^2 + (\dots)^2 + (41.43 + 33.46 + 31.47)^2}{3} - T = 106.99 \quad (\text{E.6})$$

Tabela E.3: Valores para o tratamento dos dados pelo índice (S/N)

Exp <sup>a</sup> .	Fator				Resposta (mm)			
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Erro	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$(S/N)_i$
1	115	45	0.1	1	42.22	42.30	42.64	45.47
2	115	50	0.2	2	43.16	42.89	42.96	49.70
3	115	55	0.3	3	43.65	41.75	41.56	31.29
4	120	45	0.2	3	42.75	42.67	42.59	54.38
5	120	50	0.3	1	43.62	42.51	42.92	37.67
6	120	55	0.1	2	43.61	42.49	43.04	37.73
7	125	45	0.3	2	42.67	43.39	42.93	41.43
8	125	50	0.1	3	43.21	41.42	42.45	33.46
9	125	55	0.2	1	44.14	42.49	41.94	31.47

### E.3 Desenho de Experiências: Um fator a vários níveis

#### E.3.1 Planeamento das Experiências

Tabela E.4: Planeamento das experiências

Ordem	Experiência	Réplica	Nível (g)	Resposta (g)
1	1	1	9.3	75.4
2	2		6.7	65.8
3	3		4.0	54.6
4	4		1.3	50.4
5	1	2	9.3	75.7
6	2		6.7	67.1
7	3		4.0	56.5
8	4		1.3	51.2
9	1	3	9.3	74.4
10	2		6.7	68.3
11	3		4.0	53.1
12	4		1.3	50.8
13	1	4	9.3	76.2
14	2		6.7	69.1
15	3		4.0	55.2
16	4		1.3	52.7

#### E.3.2 Verificação dos pressupostos da análise de variância

##### E.3.2.1 Normalidade

Cálculo dos resíduos com base na Equação 2.37.

Com recurso ao *software* Minitab verificou-se a normalidade dos resíduos com base no teste de Kolmogorov-Smirnov. Como se pode ver na Figura E.3 os valores distribuem-se aproximadamente em linha reta e o valor do *p-value* é maior que o nível de significância ( $\alpha = 0.05$ ). pelo que o pressuposto da normalidade é válido.

Tabela E.5: Ordem de execução das experiências

Ordem aleatória	Experiência	Réplica	Nível (g)	Resposta (g)
10	3	2	6.7	68.3
3	1	3	4.0	54.6
1	1	1	9.3	75.4
9	3	1	9.3	74.4
12	3	4	1.3	50.8
11	3	3	4.0	53.1
2	1	2	6.7	65.8
5	2	1	9.3	75.7
7	2	3	4.0	56.5
14	4	2	6.7	69.1
8	2	4	1.3	51.2
6	2	2	6.7	67.1
16	4	4	1.3	52.7
13	4	1	9.3	76.2
15	4	3	4.0	55.2
4	1	4	1.3	50.4

Tabela E.6: Cálculo dos resíduos

Nível	$y_{ij}$	$\bar{Y}_i$	$S_i^2$	$e_{ij}$
1	75.4	75.4	0.576	-0.025
	75.7			0.275
	74.4			-1.025
	76.2			0.775
2	65.8	67.6	2.076	-1.775
	67.1			-0.475
	68.3			0.725
	69.1			1.525
3	54.6	54.9	1.990	-0.250
	56.5			1.650
	53.1			-1.750
	55.2			0.350
4	50.4	51.3	1.009	-0.875
	51.2			-0.075
	50.8			-0.475
	52.7			1.425

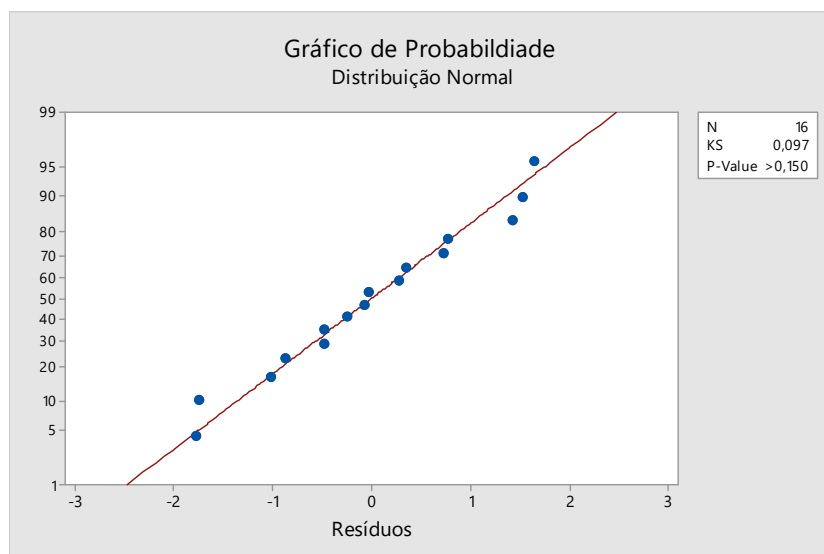


Figura E.3: Gráfico de Probabilidade - Resíduos

### E.3.2.2 Homogeneidade da variância

A verificação da homogeneidade da variância foi feita com base no Teste de Bartlett, como visto em 2.2.7.11.

Tabela E.7: Dados para o Teste de Bartlett

Variáveis	Valores
$\alpha$	5%
m	4
$v_i$	3
$v$	12
$S^2$	1.413
C	1.139

Com os valores apresentados na Tabela E.7 e as variâncias das amostra da Tabela E.6 vem, pela Equação 2.56 que.

$$\chi_B^2 = 1.334 \quad (\text{E.7})$$

Como  $\chi_{0.05;3}^2 = 7.815$  podemos concluir que as variâncias das amostras não são significativamente diferentes pois  $\chi_B^2 < \chi_{\alpha;m-1}^2$ .

### E.3.2.3 Independência dos resíduos

Para estudar a independência construiu-se um gráfico dos resíduos em função da sequência da realização das experiências com base nos dados apresentados na Tabela E.8.

Tabela E.8: Resíduos pela ordem aleatória

Ordem Aleatória	Resíduos $e_{ij}$
10	0.725
3	-0.250
1	-0.025
9	-1.025
12	-0.475
11	-1.750
2	-1.775
5	0.275
7	1.650
14	1.525
8	-0.075
6	-0.475
16	1.425
13	0.775
15	0.350
4	-0.875

Como os valores dos resíduos se distribuem aleatoriamente no gráfico (Figura E.4), sem demonstrarem qualquer tendência especial, então pode-se concluir que a hipótese de independência é satisfeita.

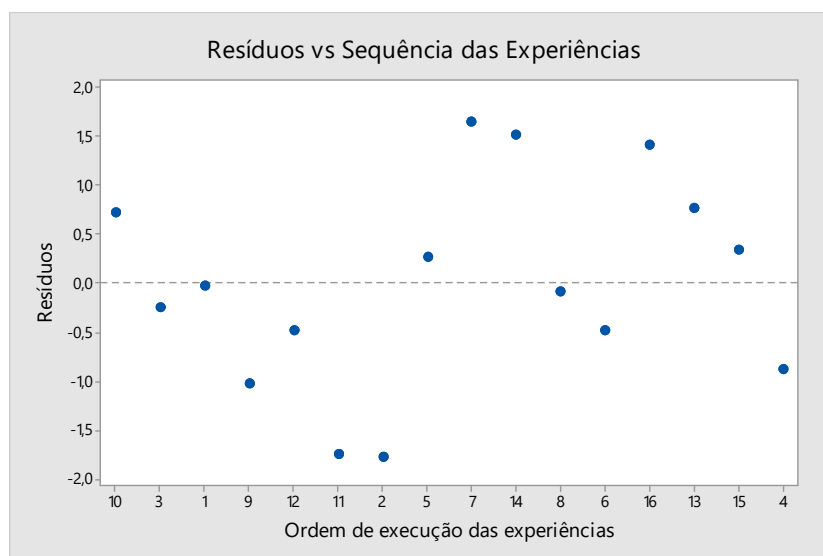


Figura E.4: Gráfico de Probabilidade - Resíduos





